

Universidad de La Salle

**Ciencia Unisalle**

---

Ingeniería Ambiental y Sanitaria

Facultad de Ingeniería

---

2020

## Propuesta para el aprovechamiento del agua de rechazo de un sistema de ósmosis inversa utilizada en una empresa de refrigerantes automotrices ubicada en el municipio de Zipaquirá, Cundinamarca

Dayana Benítez Suárez

*Universidad de La Salle, Bogotá*

Gabriela del Pilar Duarte Céspedes

*Universidad de La Salle, Bogotá*

Follow this and additional works at: [https://ciencia.lasalle.edu.co/ing\\_ambiental\\_sanitaria](https://ciencia.lasalle.edu.co/ing_ambiental_sanitaria)



Part of the [Environmental Engineering Commons](#)

---

### Citación recomendada

Benítez Suárez, D., & Duarte Céspedes, G. d. (2020). Propuesta para el aprovechamiento del agua de rechazo de un sistema de ósmosis inversa utilizada en una empresa de refrigerantes automotrices ubicada en el municipio de Zipaquirá, Cundinamarca. Retrieved from [https://ciencia.lasalle.edu.co/ing\\_ambiental\\_sanitaria/1194](https://ciencia.lasalle.edu.co/ing_ambiental_sanitaria/1194)

This Trabajo de grado - Pregrado is brought to you for free and open access by the Facultad de Ingeniería at Ciencia Unisalle. It has been accepted for inclusion in Ingeniería Ambiental y Sanitaria by an authorized administrator of Ciencia Unisalle. For more information, please contact [ciencia@lasalle.edu.co](mailto:ciencia@lasalle.edu.co).

**PROPUESTA PARA EL APROVECHAMIENTO DEL AGUA DE RECHAZO DE UN  
SISTEMA DE ÓSMOSIS INVERSA UTILIZADA EN UNA EMPRESA DE  
REFRIGERANTES AUTOMOTRICES UBICADA EN EL MUNICIPIO DE  
ZIPAQUIRÁ, CUNDINAMARCA**

**DAYANA BENÍTEZ SUAREZ  
GABRIELA DUARTE CÉSPEDES**

**UNIVERSIDAD DE LA SALLE  
FACULTAD DE INGENIERÍA  
PROGRAMA DE INGENIERÍA AMBIENTAL Y SANITARIA  
BOGOTÁ D.C.**

**2020**

PROPUESTA PARA EL APROVECHAMIENTO DEL AGUA DE RECHAZO DE UN  
SISTEMA DE ÓSMOSIS INVERSA UTILIZADA EN UNA EMPRESA DE  
REFRIGERANTES AUTOMOTRICES UBICADA EN EL MUNICIPIO DE ZIPAQUIRÁ,  
CUNDINAMARCA

DAYANA BENÍTEZ SUAREZ

41141214

GABRIELA DEL PILAR DUARTE CÉSPEDES

41141044

TRABAJO DE GRADO PRESENTADO PARA OPTAR AL TÍTULO DE  
INGENIERO AMBIENTAL Y SANITARIO

DIRECTOR

JULIO CÉSAR RAMÍREZ RODRÍGUEZ

INGENIERO QUÍMICO

UNIVERSIDAD DE LA SALLE

FACULTAD DE INGENIERÍA

PROGRAMA DE INGENIERÍA AMBIENTAL Y SANITARIA

BOGOTÁ D.C.

2020

Nota de aceptación

---

---

---

---

---

---

---

Director: Julio César Ramírez Rodríguez  
Ingeniero Químico

---

Jurado: Marcos Andrés Rodríguez Mendoza  
Ingeniero Ambiental y Sanitario

Bogotá D.C., 2020

*A Dios, por habernos permitido llegar hasta aquí, por darnos la entereza y salud  
para lograr nuestros objetivos.*

*A nuestros padres, por todo su esfuerzo para que pudiéramos llegar hasta este  
punto; por todo su apoyo, valores y consejos sin los cuales no seríamos las  
personas con sueños y metas de hoy en día.*

*A nuestros hermanos, por su amor y apoyo incondicional.*

*A nuestros sobrinos, quienes fueron nuestro motor para poder concluir esta  
carrera y llegar a ser su ejemplo para seguir.*

**- Dayana Benítez & Gabriela Duarte**

## **AGRADECIMIENTOS**

Con estas palabras queremos ofrecer un sincero agradecimiento a cada una de las partes y personas involucradas en este proceso.

En primera instancia queremos agradecerle a la Universidad por brindarnos las herramientas necesarias para nuestra formación como profesionales y por estos años llenos de experiencias únicas que nos han hecho crecer.

Agradecemos a nuestros profesores, por compartirnos su conocimiento adquirido a lo largo de sus respectivas carreras, que de una u otra forma nos han marcado.

A nuestras familias, por ser el pilar de nuestras vidas, nuestro apoyo incondicional; quienes a lo largo de los años nos mostraron como salir adelante en cada meta que nos propusiéramos. Quienes junto a nosotras fueron protagonistas de la realización y finalización de esta carrera. Por tener valores y características que son dignas de seguir y que nos han forjado como las personas que somos en la actualidad.

A nuestros amigos, por ser parte importante de nuestro proceso, por haber estado siempre presentes y más cuando los hemos necesitado; por estar cerca de nosotras ofreciendo lo mejor que tienen. Gracias.

A nuestro jurado y director de tesis, por su apoyo y su acertada orientación en la elaboración de este proyecto.

## **RESUMEN**

Para la fabricación de los refrigerantes automotrices se hace uso de agua, la cual debe contener baja carga de minerales, por lo que se emplea para desmineralizar membranas de ósmosis inversa. (Vásquez, 2017, p.9). La ósmosis es el fenómeno por el cual un solvente pasa a través de una membrana semipermeable de una disolución diluida a una concentrada para lograr un equilibrio iónico entre ambos lados de la membrana. (Mellado, 2017)

Este proyecto de grado tiene como objetivo plantear alternativas para el aprovechamiento del agua de rechazo de un sistema de ósmosis inversa, utilizada en una empresa de refrigerantes automotrices, ubicada en el municipio de Zipaquirá- Cundinamarca, con el fin de brindar estrategias económica y ambientalmente viables para la disminución del volumen de agua residuales entregada a terceros.

Para dar solución al objetivo planteado, se propusieron tres alternativas que fueron descritas y evaluadas mediante una matriz de alternativas donde fue posible la comparación por diferentes factores (área, CAPEX, OPEX, tiempo de desarrollo, riesgos potenciales) con el fin, de seleccionar la que más viabilidad y compatibilidad presentase para la empresa de refrigerantes automotrices.

Luego de realizar la evaluación y seleccionar la alternativa que más se adapta a los factores determinados, tanto económicos como ambientales, se desarrolló el inicio de la ingeniería básica cuyo propósito fue plantear una base para su futura implementación.

### **Palabras Clave:**

Ósmosis Inversa, Agua de Rechazo, Refrigerantes, Aprovechamiento, Contaminación.

## **ABSTRACT**

The water that is used for the manufacture of automotive refrigerants, must contain a low mineral charge and is for this that is used reverse osmosis membranes to demineralize. (Vásquez, 2017, p.9). Osmosis is the phenomenon by which a solvent pass through a semi-permeable membrane from a diluted solution to a concentrate to achieve an ionic equilibrium between both sides of the membrane. (Mellado, 2017)

This degree project aims to propose alternatives for the utilization of rejection water of a reverse osmosis system, used in a company of automotive refrigerants, located in the municipality of Zipaquirá- Cundinamarca, in order to provide economically and environmentally viable strategies for reducing the volume of waste water delivered to third parties.

In order to solve the objective posed, three alternatives were proposed, which were described and evaluated by means of a matrix of alternatives where comparison by different factors (area, CAPEX, OPEX, development time, potential risks) was possible in order to select the one that more feasibility and compatibility presents for the company of automotive coolants.

Then, to carried out the evaluation and chose the alternative that were the best suits the specific factors, both economic and environmental, the beginning of basic engineering was specified, the purpose of which was to establish a basis for its future implementation.

### **Key words:**

Reverse osmosis, Rejection water, Refrigerants, Exploitation, Polution



## TABLA DE CONTENIDOS

|   |           |
|---|-----------|
| <b>GLOSARIO.....</b>  | <b>1</b>  |
| <b>INTRODUCCIÓN.....</b>  | <b>2</b>  |
| <b>JUSTIFICACIÓN.....</b>   | <b>3</b>  |
| <b>OBJETIVOS .....</b>  | <b>5</b>  |
| Objetivo General  |           |
| Objetivos Específicos   |           |
| <b>MARCO DE REFERENCIA.....</b>                                     | <b>6</b>  |
| <b>MARCO CONCEPTUAL.....</b>  | <b>6</b>  |
| <b>MARCO TEÓRICO.....</b>   | <b>7</b>  |
| 1.    Refrigerantes   |           |
| 2.    Ósmosis inversa   |           |
| 3.    Agua Residuales industriales                                  |           |
| <b>MARCO LEGAL.....</b>   | <b>10</b> |
| <b>DISEÑO METODOLOGICO.....</b>                                     | <b>11</b> |
| FASE I: Diagnóstico.....  | 11        |
| FASE II: Alternativas .....   | 16        |
| FASE III: Ingeniería básica.....                                    | 19        |
| <b>FASE I: Diagnóstico.....</b>                                     | <b>22</b> |
| 1.1.    Caracterización fisicoquímica.....                          | 25        |
| 1.2.    Tamaño y distribución de la empresa.....                    | 31        |
| 1.3.    Balance Hídrico.....  | 31        |
| <b>FASE II: Alternativas.....</b>                                   | <b>36</b> |
| Alternativa 1: Agua de riego.....                                   | 37        |
| Alternativa 2: Recirculación y descarga de aparatos sanitarios..... | 47        |
| Alternativa 3: Evaporización y cristalización.....                  | 58        |
| Evaluación de alternativas.....                                     | 68        |
| <b>FASE III: Ingeniería Básica.....</b>                             | <b>72</b> |
| P&ID.....   | 73        |
| Layout .....  | 74        |
| Análisis de costo-beneficio.....                                    | 76        |
| <b>CONCLUSIONES.....</b>  | <b>78</b> |
| <b>RECOMENDACIONES.....</b>   | <b>80</b> |
| <b>REFERENCIAS.....</b>   | <b>81</b> |
| <b>ANEXOS.....</b>  | <b>87</b> |

## LISTA DE TABLAS

|  |    |
|--|----|
| <b>Tabla 1.</b> Sustancias utilizadas en la fabricación de refrigerantes.....  | 8  |
| <b>Tabla 2.</b> Normatividad asociada.....   | 10 |
| <b>Tabla 3.</b> Métodos de ensayo y referencias basados en el documento “ <i>Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater 23d Edition 2017</i> ” ..... | 13 |
| <b>Tabla 4.</b> Especificaciones medidor HI9811-5.....   | 14 |
| <b>Tabla 5.</b> Matriz de evaluación de alternativas.....  | 17 |
| <b>Tabla 6.</b> Matriz costo- beneficio.....   | 21 |
| <b>Tabla 7.</b> Parámetros agua de alimentación.....   | 24 |
| <b>Tabla 8.</b> Parámetros fisicoquímicos del afluente.....  | 25 |
| <b>Tabla 9.</b> Valores de conductividad y pH del Agua Potable.....  | 26 |
| <b>Tabla 10.</b> Valores de conductividad y pH del agua de rechazo.....  | 26 |
| <b>Tabla 11.</b> Valor de conductividad y pH del agua de proceso.....  | 27 |
| <b>Tabla 12.</b> Interpolación.....  | 28 |
| <b>Tabla 13.</b> Parámetros fisicoquímicos del agua de rechazo del Sistema de ósmosis inversa....  | 30 |
| <b>Tabla 14.</b> Datos técnicos GLM 50C Professional.....  | 31 |
| <b>Tabla 15.</b> Criterios de calidad uso agrícola.....  | 38 |
| <b>Tabla 16.</b> Listado de insumos requeridos para la alternativa 1.....  | 42 |
| <b>Tabla 17.</b> Análisis de costos preliminar.....  | 45 |
| <b>Tabla 18.</b> Evaluación de riesgos.....  | 46 |
| <b>Tabla 19.</b> Criterios de calidad uso en descarga de aparatos sanitarios.....  | 48 |
| <b>Tabla 20.</b> Factores pico para caudales de tratamiento de aguas residuales, RAS 2017.....   | 50 |
| <b>Tabla 21.</b> Listado de equipos requeridos para la alternativa 2.....  | 53 |
| <b>Tabla 22.</b> Análisis preliminar de costos para la Alternativa 2.....  | 56 |
| <b>Tabla 23.</b> Evaluación de riesgos alternativa 2.....  | 57 |
| <b>Tabla 24.</b> Listado de equipos requeridos para la alternativa 3.....  | 63 |
| <b>Tabla 25.</b> Análisis de costos preliminar.....  | 66 |
| <b>Tabla 26.</b> Evaluación de riesgos alternativa 3.....  | 68 |
| <b>Tabla 27.</b> Evaluación de alternativas.....   | 71 |
| <b>Tabla 28.</b> Matriz B/C.....   | 77 |

## LISTA DE ILUSTRACIONES

|   |    |
|---|----|
| <b>Ilustración 1.</b> Esquema de ejecución de monitoreo.....                    | 12 |
| <b>Ilustración 2.</b> Diagrama del sistema implementado.....                    | 22 |
| <b>Ilustración 3.</b> Constantes de sondas.....                                 | 28 |
| <b>Ilustración 4.</b> Diagrama de bloques tratamiento de agua.....              | 33 |
| <b>Ilustración 5.</b> Diagrama de flujo de procesos de la alternativa 1.....    | 39 |
| <b>Ilustración 6.</b> Balance de materia por caudales, alternativa 1.....       | 40 |
| <b>Ilustración 7.</b> Flujo de caja alternativa 1.....                          | 43 |
| <b>Ilustración 8.</b> Matriz P&I alternativa 1.....                             | 46 |
| <b>Ilustración 9.</b> Diagrama de flujo de proceso alternativa 2.....           | 49 |
| <b>Ilustración 10.</b> Diagrama de bloques alternativa 2.....                   | 51 |
| <b>Ilustración 11.</b> Balance de materia para hallar C.....                    | 52 |
| <b>Ilustración 12.</b> Flujo de caja alternativa 2.....                         | 55 |
| <b>Ilustración 13.</b> Matriz P&I para alternativa 2.....                       | 57 |
| <b>Ilustración 14.</b> Diagrama de flujo de procesos alternativa 3.....         | 60 |
| <b>Ilustración 15.</b> Balance de materia alternativa 3.....                    | 61 |
| <b>Ilustración 16.</b> Flujo de caja alternativa 3.....                         | 65 |
| <b>Ilustración 17.</b> Matriz P&I alternativa 3.....                            | 67 |
| <b>Ilustración 18.</b> Diagrama de tubería e instrumentación alternativa 2..... | 75 |

## GLOSARIO

**Agua de Rechazo:** Es el agua que no ha pasado a través de las membranas de ósmosis y que lleva la totalidad de las sales y contaminantes. (Sistemas de tratamiento de agua, 2010).

**Análisis físico y químico del agua:** Son aquellos procedimientos de laboratorio que se efectúan a una muestra de agua para evaluar sus características físicas, químicas o ambas. (Resolución 2115 del 2007).

**Balance de masa:** como una contabilidad de entradas y salidas de masa en un proceso o de una parte de éste. Granados et, al. (2018)

**Criterio de Calidad.** Es el conjunto de parámetros con sus respectivos valores límites máximos permisibles que se establecen para un uso definido. (Resolución 1207 de 2014)

**Embalaje:** Es una forma de empaque que envuelve, contiene, protege y conserva los productos envasados; facilita las operaciones de transporte al informar en el exterior las condiciones de manejo, requisitos, símbolos, e identificación de su contenido. (Perez, 2012)

**Membrana semipermeable:** Actúan como estructuras laminares y son atravesadas por el agua; no pasa ningún tipo de soluto. (Cabrera, s.f)

**Ósmosis:** Fenómeno natural por el cual se proveen de agua las células vegetales y animales para mantener la vida. (Ósmosis Inversa, 2007).

**Ósmosis inversa:** La ósmosis inversa consiste en separar un componente de otro en una solución, mediante las fuerzas ejercidas sobre una membrana semipermeable. (Ósmosis Inversa, 2007)

**Reusó:** Es la utilización de las aguas residuales tratadas cumpliendo con los criterios de calidad requeridos para el uso al que se le va a destinar. (Resolución 1207 de 2014)

## INTRODUCCIÓN

En los últimos años, ha sido posible evidenciar que en la mayoría de los países se presentan problemas de contaminación en cuerpos de agua, fruto de la mayoría de las actividades realizadas por la sociedad. Es necesario tener en cuenta que el sector industrial no sólo es el que más gasta, también es uno de los que más contamina. Más de un 80% de los desechos peligrosos del mundo se producen en los países industrializados, mientras que en las naciones en vías de desarrollo un 70% de los residuos que se generan en las fábricas se vierten al agua sin ningún tipo de tratamiento previo, contaminando así los recursos hídricos disponibles. (Fernández et al., 2006)

Los anteriores datos demuestran la importancia del adecuado manejo de las aguas residuales y su posterior reutilización dentro del sector industrial, demuestran la necesidad de que cada ciudadano y cada empresa, ha de tomar conciencia de que el agua dulce es un recurso natural cada vez más escaso tanto a nivel superficial como subterráneo, necesario no sólo para el desarrollo económico, sino imprescindible como soporte de cualquier forma de vida en la naturaleza. No cabe duda de que la industria es motor de crecimiento económico y, por lo tanto, clave del progreso social. (Fernández et al., 2006)

Para abordar esta problemática desde el punto de vista de una empresa productora de refrigerantes, dentro del proyecto se plantearán alternativas para la recuperación del agua de rechazo proveniente del sistema de ósmosis inversa, con el fin de disminuir el volumen de agua de rechazo generado y al mismo tiempo plantear un uso adecuado de acuerdo con sus características físicoquímicas y la capacidad de la empresa.

El proyecto se estructuro en tres fases (diagnóstico, alternativas e ingeniería base). La primera fase tiene como fin crear una línea base con la cual sea posible establecer la condición de la empresa, así como, las características tanto de su locación como del agua utilizada. Para la segunda fase, se tomarán los datos obtenidos en el diagnóstico anterior para así desarrollar el planteamiento y la viabilidad técnica, económica y ambiental siguiendo la normatividad de reusó establecida en la resolución 1207/2014 con el fin de alcanzar la selección más adecuada. Finalmente, en la fase tres se estructuran la opción seleccionada con anterioridad y se realiza un análisis costo- beneficio de esta.

## JUSTIFICACIÓN

Uno de los recursos más importantes, básicos y finito además de insustituible presente en cada uno de los ecosistemas en diferentes proporciones, y que beneficia el desarrollo del ambiente tal cual lo conocemos por poseer características determinantes en procesos tanto físicos como químicos y biológicos, es el agua. (Orozco, 2013)

Según la Organización de las Naciones Unidas- ONU el agua está en el epicentro del desarrollo sostenible y es fundamental para el desarrollo socioeconómico, la energía y la producción de alimentos, los ecosistemas saludables y para la supervivencia misma de los seres humanos. El agua también forma parte crucial de la adaptación al cambio climático, y es el vínculo crucial entre la sociedad y el medioambiente.

Sin embargo, en los últimos años se han venido presentando zonas donde acceder a este recurso presenta dificultades gracias a que un gran porcentaje de cuerpos de agua se encuentran contaminados (imposibilitando su consumo por las afectaciones a la salud que pueden traer) o por consecuencia del cambio climático y un uso errático se han venido secando poco a poco las fuentes disponibles.

La Organización Mundial de la Salud- OMS presenta cifras en la que expone que la escasez de agua afecta a todos los continentes y a cuatro de cada diez personas en el mundo. No obstante, esta situación está empeorando debido al crecimiento de la población, el desarrollo urbanístico y el aumento del uso del agua con fines industriales y domésticos.

La mayoría de las actividades humanas generan aguas residuales, y más del 80% de las aguas residuales de todo el mundo se liberan en el medio ambiente sin tratamiento. (UNESCO, 2017)

Para dar solución a esta escasez y poder garantizar el acceso a este recurso se hace necesario plantear alternativas para su tratamiento, razón por la cual la Organización de las Naciones Unidas para la Educación la Ciencia y la Cultura (UNESCO, 2017) dice que debemos situar la mejora de la gestión de las aguas residuales en el centro de una economía circular, logrando un equilibrio entre el desarrollo y la protección y el uso sostenible de los recursos naturales. Ello aportará amplios beneficios, con repercusiones en la seguridad alimentaria y energética y en la atenuación de los efectos del cambio climático.

También es necesario tener en cuenta que las oportunidades que ofrece el aprovechamiento de las aguas residuales como recurso son enormes. Cuando son gestionadas de forma adecuada, las aguas residuales son una fuente asequible y sostenible de agua, energía, nutriente y otros materiales recuperables. (UNESCO, 2017)

Dentro la empresa productora de refrigerantes automotrices ubicada en el municipio de Zipaquirá, se implementó un sistema de ósmosis inversa, el cual, tiene como finalidad procesar aproximadamente 714.28 L/día de agua de los cuales aproximadamente el 60% es utilizado en la producción de los refrigerantes mientras que el porcentaje restante representa agua de rechazo. Este volumen de agua representa mayor costo de disposición de sus aguas residuales, ya que la empresa al no contar con una planta de tratamiento de agua residual se ve obligados a pagar a terceros para su posterior tratamiento; la finalidad de este proyecto es presentar alternativas que posibiliten el aprovechamiento del agua de rechazo dentro de la misma.

El proyecto solo representa una propuesta que puede ser o no implementada, sin embargo, para su aplicación la empresa fabricante de refrigerantes es la encargada de decidir si ejecutar la alternativa escogida; por esta razón el proyecto no presenta delimitación.

## **OBJETIVOS**

### **Objetivo General**

Plantear alternativas para el aprovechamiento del agua de rechazo de un sistema de ósmosis inversa, utilizada en una empresa de refrigerantes automotrices, ubicada en el municipio de Zipaquirá, Cundinamarca.

### **Objetivos Específicos**

- Establecer los consumos de agua de la empresa mediante aforos manuales y determinar las características fisicoquímicas del agua de entrada y de rechazo del sistema de ósmosis inversa.
- Identificar la viabilidad técnica y económica para el desarrollo del proyecto mediante el planteamiento de una matriz de evaluación de alternativas cuyo propósito sea facilitar la elección.
- Definir la ingeniería básica de la alternativa valorada como pertinentes en el análisis de la matriz establecida, con el objeto de completar el alcance de esta, dejando una base para el desarrollo de una ingeniería de detalle.



## MARCO DE REFERENCIA

### MARCO CONCEPTUAL

Para la fabricación de los refrigerantes automotrices se hace uso de agua, la cual debe contener baja carga de minerales, por lo que se emplea para desmineralizar membranas de ósmosis inversa. “La ósmosis es el fenómeno por el cual un solvente pasa a través de una membrana semipermeable de una disolución diluida a una concentrada para lograr un equilibrio iónico entre ambos lados de la membrana”. (Vásquez, 2017, p.9)

“ENOHSA, 2003 expresa que una membrana es un componente fundamental para el desarrollo de este proceso ya que se encarga de separar dos fases y actuar como barrera selectiva para el transporte de materia, permitiendo el pasaje de agua, iones o moléculas pequeñas a través de estas”. (Cabezas, 2013, p.45)

La selección de las membranas se realiza de acuerdo con las características del afluente a tratar, dependiendo del estudio de calidad del agua y el lugar de origen de la misma, se debe seleccionar las membranas. (Gómez, 2018)

Por lo anterior a nivel comercial se trabajan membranas con diferente material y geometría como lo son planas, tubulares o en forma de espiral, las cuales serán explicadas a continuación:

Las membranas planas se fabrican en forma de lámina de papel con el propósito de que ingrese por el extremo abierto del módulo y circula paralelamente al tubo colector central, a lo largo de los espacios o canales formados por los espaciadores entre las dos caras activas de las membranas. La corriente de permeado se dirige hacia la parte exterior siguiendo un camino en forma de espiral. (Cabezas, 2013, p.45).

La tubulares al contrario de las planas son en forma de tubo hueco y hacen que el “agua salada circule por el interior del tubo y el agua desalada fluye radialmente del interior hacia el exterior. El rechazo se obtiene en el otro extremo del tubo” (Cabezas, 2013, p.45).

Por último, se encuentran las espirales que están constituidos por membranas planas que se enrollan en espiral en torno a un tubo central, de plástico con orificios en el cual fluye el permeado.

Lo anterior es importante tenerlo en cuenta ya que en ocasiones se puede presentar ensuciamiento al momento de realizar la filtración lo que puede llegar a reducir el flujo y la capacidad de rechazo de sales; aumentando de este modo el consumo energético y la presión de alimentación del proceso. (Apartado, 2009)

Por otro lado, el agua de rechazo que se obtiene debe ser tratada para que no genere impactos ambientales o problemas para disponer de ella, por lo que se deben tener alternativas las cuales ayuden a disminuir la cantidad de agua de rechazo y posterior a ello poder utilizarla en otras actividades.

## **MARCO TEÓRICO**

### **1. Refrigerantes**

La función principal del líquido refrigerante es absorber el calor del motor para evitar peligrosos sobrecalentamientos. Además, al tolerar temperaturas muy bajas, no permite que las piezas se congelen en invierno, lo cual causaría graves inconvenientes mecánicos. También actúa como lubricante, limpia y protege de la oxidación a las piezas del sistema de refrigeración gracias a sus propiedades anticorrosiva. (Euromaster Automocion y Servicios, S.A., 2019)

Los Refrigerantes utilizados en la empresa hacen uso de sustancias las cuales se presentan a continuación:

**Tabla 1. Sustancias utilizadas en la fabricación de refrigerantes**

| <b>Componente</b>  | <b>Características que proporcionan</b>   |
|--|---|
| <b>Etilenglicol</b><br><b>Propilenglicol</b><br><b>Metanol</b> | Tiene como función aumentar el punto de ebullición del agua común y es la base del refrigerante. Según la cantidad distingue entre las diferentes presentaciones de refrigerantes.                                      |
| <b>Buffer</b>  | Sustancia que mantiene el pH del líquido refrigerante en un valor conveniente para evitar condiciones que propicien la corrosión.   |
| <b>Agua desmineralizada</b>                                    | Agua que ha pasado por un proceso previo de eliminación del cloro para evitar que cause corrosión y por una remoción de sales, para evitar la formación de incrustaciones en el interior del motor.                     |
| <b>Antiespumante</b>   | Evita la formación de burbujas que puedan causar problemas de erosión y cavitación.   |
| <b>Color</b>   | Se usan colores fluorescentes que permiten identificar fugas del producto, verde o azul para refrigerantes con contenidos de glicol inferiores al 40% y naranja o violeta para refrigerantes con contenidos superiores. |

Fuente: (Velandia y Urbina, 2008)

## 2. Ósmosis inversa

La ósmosis es el fenómeno por el cual un solvente pasa a través de una membrana semipermeable de una disolución diluida a una concentrada para lograr un equilibrio iónico entre ambos lados de la membrana. (Mellado, 2017)

Los factores más influyentes que pueden cambiar la operación de un equipo de ósmosis inversa y por consecuencia su eficiencia es:

- pH: El pH del agua afecta cuán soluble son algunos de los compuestos que están presentes en el agua. (Mellado, 2017)
- Temperatura: está directamente relacionada con la viscosidad del agua, y con la capacidad de disolución que tendrá. A mayor temperatura del agua menor la viscosidad y mayor la capacidad disolutiva, hasta un punto, ya que las membranas están hechas de polímeros que pueden sufrir alteraciones a altas temperaturas. (Mellado, 2017)
- Viscosidad – La viscosidad del agua depende en gran parte de la temperatura y de los elementos disueltos en ella, a mayor viscosidad la presión de operación deberá incrementar y así la energía usada será mayor. (Mellado, 2017)
- Solubilidad máxima – En aguas con concentraciones altas de un compuesto, el porcentaje de eficiencia se ve limitado por éste, ya que el agua alcanzará el punto de solubilidad máximo de ese compuesto a un porcentaje bajo de recuperación. (Mellado, 2017)

## **2.1. Características del sistema de ósmosis inversa**

- Permite remover la mayoría de los sólidos (inorgánicos u orgánicos) disueltos en el agua (99%).
- Remueve los materiales suspendidos y microorganismos.
- Proceso de purificación de forma continua.
- Tecnología simple, que no requiere de mucho mantenimiento.
- Es modular y necesita poco espacio, de acuerdo a los caudales deseados.

### 3. Agua Residuales industriales

Son aquellas provenientes de las distintas industrias que existen generalmente fuera de las áreas urbanas y que deben tratar sus desagües antes de ser vertidos a los alcantarillados, siguiendo las normas sobre vertidos de descargas industriales, relacionado principalmente con la carga orgánica CO, los aceites y grasas, temperatura, pH sustancias recalcitrantes o xenobióticos. (Carreño, 2016)

#### MARCO LEGAL

Tabla 2. Normatividad asociada

| NORMA                   | DESCRIPCIÓN   | INCIDENCIA EN EL PROYECTO  |
|-------------------------|---|--|
| Resolución 0631 de 2015 | Por la cual se establecen los parámetros y los valores límites máximos permisibles en los vertimientos puntuales a cuerpos de aguas superficiales y a los sistemas de alcantarillado público y se dictan otras disposiciones. | Esta Resolución se utilizará como instrumento para evaluar las características fisicoquímicas del agua de rechazo de los sistemas de OI con el fin de establecer alternativas para su disposición. |
| Resolución 1207 de 2014 | Por la cual se adoptan disposiciones relacionadas con el uso de aguas residuales tratadas.  | Es aplicable para poder plantear las alternativas de aprovechamiento siguiendo los criterios establecidos en esta normatividad para la reutilización del agua.                                     |

**Fuente:** Autores

## **DISEÑO METODOLOGICO**

Para poder tener un correcto desarrollo de este proyecto se plantearon una serie de actividades agrupadas en tres fases (diagnóstico, alternativas e ingeniería básica) correspondientes a cada uno de los objetivos específicos planteados. A continuación, se presentan las fases con sus correspondientes actividades.

### **FASE I: Diagnóstico**

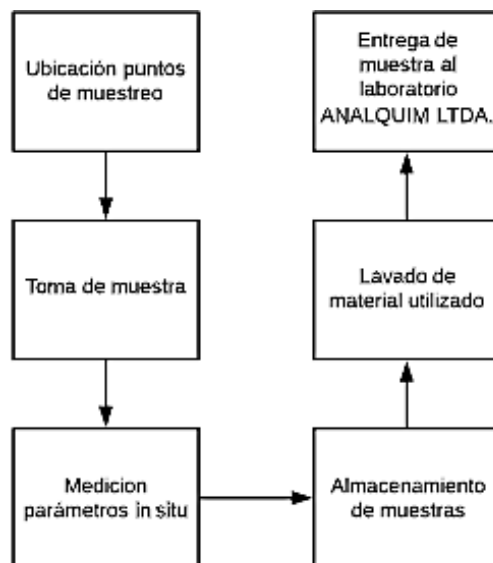
Dentro de esta fase se pretendió realizar un análisis con el fin de poder identificar aspectos relevantes para el desarrollo del proyecto, como por ejemplo los consumos de agua que se presentan dentro de la empresa, así como, el porcentaje de agua de rechazo generado por el sistema de ósmosis inversa; para esto se realizaron las siguientes actividades.

- 1. Caracterización fisicoquímica:** Durante la elaboración del proyecto se elaboró un muestreo al inicio del proyecto, en el que fue posible identificar las características del agua que es utilizada para proceso productivo de la empresa.

### **Procedimiento del monitoreo**

Para la ejecución del monitoreo la empresa ejecuto consecutivamente cada una de las siguientes actividades:

**Ilustración 1. Esquema de ejecución de monitoreo.**



**Fuente:** Autores

Para la localización de los puntos de muestreo la empresa tomo tres puntos en los cuales se podía realizar la caracterización del agua potable, agua para batería y el agua de rechazo proveniente del sistema ósmosis inversa.

Para la toma de muestra se seleccionó la metodología de toma de muestra simple o puntual, en la cual es necesario la utilización de un muestreador, al momento de la toma fue necesario que se traspasará el volumen de agua recogido.

La medición de los parámetros in situ fue realizada por la empresa en la que se tuvieron en cuenta los parámetros de pH, temperatura y conductividad, cuyos valores quedaron establecidos en la cadena de custodia correspondiente.

Para el almacenamiento de muestras la empresa tuvo en cuenta los requerimientos especificados en la cadena de custodia con el fin de retardar los cambios químicos hasta que la

muestra fuera entregada al laboratorio y analizada por el mismo. El embalaje se realizó en una nevera con medio refrigerante, procurando evitar el daño durante su transporte.

Al final del muestreo la persona encargada del muestreo realizó el lavado del material utilizado. Finalmente se realizó la entrega de las muestras recolectadas al laboratorio ANALQUIM LTDA.

Las técnicas de análisis utilizadas por el laboratorio ANALQUIM LTDA, a partir del documento “*Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater 23d Edition 2017*” con el objeto de evaluar la calidad del agua son descritos a continuación:

**Tabla 3. Métodos de ensayo y referencias basados en el documento “*Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater 23d Edition 2017*”**

| <b>Variable</b> | <b>Técnicas de análisis</b>  | <b>Referencia</b>           |
|-----------------|------------------------------|-----------------------------|
| Cloruros        | Volumétrico                  | SM 4500 – Cl B              |
| Color Aparente  | Comparación visual           | SM 2120 B                   |
| Conductividad   | Electrometría                | SM 2510                     |
| Dureza total    | Volumétrico                  | SM 2340 C                   |
| Hierro          | Espectrofotometría de A. A   | SM 3030 K, SM 3111B         |
| pH              | Electrométrico               | SM 4500 – HB                |
| Sólidos Totales | Gravimétrico- Secado a 105°C | SM 2540 B                   |
| Sulfatos        | Turbidímetro                 | SM 4500 – SO <sub>4</sub> E |
| Turbiedad       | Nefelométrico                | SM 2130 B                   |

**Fuente:** Autores

Los parámetros contratados por la empresa fueron turbiedad, color aparente, cloruros, hierro, pH, sólidos totales, sulfatos, dureza total y conductividad.



De igual forma para la realización de este proyecto se tuvieron en cuenta los parámetros establecidos por Romero (2006) como importantes en el proceso de ósmosis inversa. Estos parámetros son los siguientes,

- 1.1. **Sólidos disueltos totales (SDT):** para obtener este valor se realizó un muestreo con ayuda de un medidor portátil de temperatura, pH y conductividad (HI9811-5) este medidor posee las siguientes especificaciones.

**Tabla 4. Especificaciones medidor HI9811-5**

|   |  |
|---|--|
| <b>Rango pH</b>                           | 0.0 a 14.0 pH  |
| <b>Rango EC</b>                           | 0 a 6000 $\mu\text{S}/\text{cm}$   |
| <b>Rango Temperatura</b>                  | 0 a 60°C   |
| <b>Resolución pH</b>                      | 0.1 pH   |
| <b>Resolución EC</b>                      | 10 $\mu\text{S}/\text{cm}$   |
| <b>Resolución Temperatura</b>             | 0°C  |
| <b>Precisión (@20°C/68°F) pH</b>          | $\pm 0.1$ pH   |
| <b>Precisión (@20°C/68°F) EC</b>          | $\pm 2\%$ F. S   |
| <b>Precisión (@20°C/68°F) Temperatura</b> | $\pm 0.5^\circ\text{C}$  |
| <b>Factor de conversión TDS</b>           | 0.5 ppm (mg/L) = 1 $\mu\text{S}/\text{cm}$   |
| <b>Calibración</b>                        | Manual en 1 punto (todos los parámetros excepto la temperatura)  |
| <b>Compensación de temperatura</b>        | Automático de 0 a 50°C (32 a 122°F) con b = 2% /°C (EC/SDT solamente)  |
| <b>Sonda</b>                              | HI 1285-5 cuerpo de polipropileno, sonda multiparámetro pre-amplificada con sensor interno de temperatura, conector DIN de 8 pines y cable de 1 m (3.3') |

**Fuente:** (Hanna Instruments, s. f)

Se tomaron seis muestras simples para la entrada de agua potable, seis muestras para el agua de rechazo y una muestra para el agua utilizada en el proceso.

1.2. **Presión neta:** la cual está relacionada con las condiciones de funcionamiento según la siguiente ecuación,

$$\text{Presión neta} = \text{presión de abastecimiento} - \text{contrapresión} - \text{presión osmótica}$$

Donde, la presión de abastecimiento es la presión manométrica, la contrapresión es la presión sobre el costado de salida de la membrana y presión osmótica es la debida a la concentración de SDT en el agua.

1.3. **Temperatura:** determina la producción en un módulo de OI, por su efecto sobre la viscosidad del agua; esta fue toma con ayuda del medidor HI 9811-5.

Finalmente, se realizó la caracterización del efluente que contiene el agua de rechazo con el fin de identificar y plantear las alternativas de reusó; los parámetros ha tener en cuenta son los siguientes: Turbiedad, Color aparente, Cloruros, Hierro, olor, pH, Solidos Totales, Sulfatos Dureza Total y Conductividad.

2. **Tamaño y distribución de la empresa:** Se elaboró un *layout* donde se especificó la distribución de los elementos o unidades que se encuentran actualmente dentro de la empresa.
3. **Balance hídrico:** este concepto está basado en la ley de conservación de la materia o ecuación de continuidad, es necesario aclarar que los términos presentados en la ecuación tienen dimensiones de masa. (Castro, 2018)

$$\text{Entradas} - \text{Salidas} + \text{Producción} = \text{Acumulación}$$

Para la resolución del balance total se elaboró un diagrama de bloques donde es posible identificar cada una de las variables disponibles dentro del proceso llevado en la empresa, esto con el fin de poder conocer el consumo de agua dentro de la empresa, así como el balance de agua dentro de la misma.

De igual forma se estableció el balance parcial para el sistema de ósmosis inversa mediante un diagrama de bloques esto con el fin de identificar el volumen de agua que entra y sale, así como el porcentaje de agua de rechazo dentro de esta unidad de tratamiento.

## **FASE II: Alternativas**

A partir de la fase anterior, donde es posible establecer una línea base para el desarrollo del proyecto, se plantearon una serie de alternativas que serán evaluadas con ayuda de una matriz de factibilidad y beneficio con el fin de establecer un uso adecuado para el agua de rechazo proveniente del tratamiento por membranas de ósmosis inversa.

- 1. Diagrama de flujo de proceso (PFD):** se realizó una representación esquemática del proceso para mostrar las condiciones en operación al momento de implementar la alternativa, proporcionando una información concisa de todos los pasos que compone el proceso de fabricación interna; esto se realizó para cada una de las alternativas.
- 2. Balance de materia y energía:** para estos balances fue aplicada la ley de la conservación de la masa y energía, teniendo en cuenta su realización para cada una de las alternativas propuestas. (Himmelblau, 2015).
- 3. Listado de equipos:** se especificó cada uno de los equipos que necesitaron las alternativas propuestas, esto con el fin de facilitar la realización del análisis de costos preliminar.
- 4. Análisis de costos preliminar:** se desarrolló una estimación de costos en la cual es posible tener una aproximación de los recursos financieros necesarios para llevar acabo cada una de las alternativas establecidas.

- 5. Matriz probabilidad-impacto:** se desarrolló esta matriz con el fin de priorizar los riesgos, que estarán directamente relacionados con probabilidad de ocurrencia y el impacto obteniendo como resultado riesgos potenciales con diferentes grados de exposición para así tomar medidas apropiadas a posibles eventos.
- 6. Evaluación y selección de alternativas:** Para esta actividad se evaluó cada alternativa para diferentes criterios haciendo uso de la siguiente matriz,

**Tabla 5. Matriz de evaluación de alternativas.**

| <i><b>FACTORES</b></i>                       | <i><b>A</b></i> | <i><b>B</b></i> | <i><b>C</b></i> |
|--|-----------------|-----------------|-----------------|
| Área   | -               | -               | -               |
| CAPEX  | -               | -               | -               |
| OPEX   | -               | -               | -               |
| Payback                                      | -               | -               | -               |
| Tiempo de desarrollo                         | -               | -               | -               |
| Factibilidad técnica                         | -               | -               | -               |
| Factibilidad operacional                     | -               | -               | -               |
| Riesgos potenciales                          |                 |                 |                 |
| – Baja calidad de agua                       | -               | -               | -               |
| – Impactos ambientales                       | -               | -               | -               |
| – Pérdidas económicas                        | -               | -               | -               |
| Consumo energético                           | -               | -               | -               |
| Concordancia con los objetivos empresariales | -               | -               | -               |
| <b>TOTAL</b>                                 | -               | -               | -               |

Fuente: Autores

Los valores para la evaluación por criterio van de 1 a 5 (siendo 1 muy poco importante y 5 muy importante) y se realizó la sumatoria por alternativa donde la que obtuvo el valor más alto será la más deseable u óptima.

Los factores establecidos para la resolución de la matriz son descritos a continuación:

- 5.1. Área:** Se establece para poder definir si la alternativa es factible teniendo en cuenta su ubicación dentro de la empresa y el área a ocupar.
- 5.2. CAPEX:** son importantes para poder establecer cual alternativa requiere menor inversión de capital, sin modificar la capacidad productiva teniendo en cuenta que CAPEX se define como la serie de inversiones que se realizan en los diferentes equipos e instalaciones con el fin tanto de mantener como de aumentar los niveles de la producción, o también, para mantener el funcionamiento de un negocio o un sistema particular. (Amendola Luis, 2016)
- 5.3. OPEX:** son importantes para poder establecer cual alternativa requiere menor inversión de capital, sin modificar la capacidad productiva teniendo en cuenta que, OPEX se define como los costes asociados al mantenimiento de los equipos, incluyendo tanto los gastos de consumibles y otros gastos necesarios para llevar a cabo la actividad, así como otras partidas a las que la empresa debe hacer frente al margen de su producción, como pueden ser las nóminas o los impuestos. (Amendola Luis, 2016)
- 5.4. Payback:** Tasa de retorno de las alternativas.
- 5.5. Tiempo de desarrollo:** establece el tiempo que la alternativa requiere para su desarrollo iniciando desde el montaje.
- 5.6. Factibilidad técnica:** hace referencia a los insumos que requerirá el proyecto, así como a la producción de bienes y servicios, de igual forma a la posibilidad de satisfacer los requerimientos del equipamiento tecnológico necesario para el proyecto involucrado. (Universidad Monte Ávila, s.f.)

**5.7. Factibilidad operacional:** está vinculada a la disponibilidad en el momento y en el lugar adecuado, de los recursos humanos que habrán de participar en el proyecto, principalmente cuando éste se convierta en resultados y debe ser operado a través de esos recursos. (Universidad Monte Ávila, s.f.)

**5.8. Riesgos potenciales:** El riesgo de un proyecto es un evento o condición incierta que, de producirse tiene un efecto positivo o negativo en uno o más objetivos del proyecto, tales como el alcance, el cronograma, el costo y la calidad (Córdova, 2016).

**5.9. Consumo energético:** este factor será útil al momento de conocer los gastos energéticos al momento de implementar cada una de las alternativas planteadas para el desarrollo de este proyecto, gracias a este se podrá conocer si el mismo aumenta, disminuye o se mantiene.

**5.10. Concordancia con los objetivos empresariales:** este factor es útil para establecer cuál de las alternativas se adapta mejor con los objetivos empresariales.

### **FASE III: Ingeniería básica**

Dentro de esta fase se planteó la ingeniería básica de la alternativa seleccionada a partir de la matriz de selección de alternativas. A partir de la alternativa seleccionada se pretende reducir la cantidad de agua de rechazo producida durante el tratamiento por medio de las membranas de ósmosis inversa.

En esta fase para poder definir los lineamientos generales de la alternativa, se realizaron las siguientes actividades:

- 1. Elaboración P&ID:** Se elaboró el diagrama de la alternativa considerada viable donde se observan tuberías, instrumentación y componentes del equipo, además estos

diagramas contienen una serie de símbolos que nos permiten identificar todos los componentes que conforman el proceso. Lo anterior se elaboró con ayuda del procesador de diseño Visio el cual sirve para crear todo tipo de gráficos y diagramas.

2. **Elaboración Layout:** Se elaboró con ayuda del programa AutoCAD y tiene como finalidad mostrar la disposición y dimensión de equipos.
3. **Análisis de costo- beneficio:** Para esta actividad se toma la relación beneficio/costo, que consiste en poner el valor presente todos los costos del proyecto. (Baca, 2000)

La relación B/C tiene la siguiente ecuación:

$$Relacion\ B/C = \frac{Valor\ presente\ de\ los\ ingresos}{Valor\ presente\ de\ los\ costos}$$

De igual forma para este análisis se hace uso del valor presente neto (VPN), que es el más utilizado porque pone en pesos de hoy tanto los ingresos como los egresos futuros, lo cual facilita la decisión desde el punto de vista financiero, de realizar o no un proyecto. (Baca, 2000)

$$VPN = \sum F_n(1+i)^{-n} = F_0 + F_1(1+i)^{-1} + F_2(1+i)^{-2} + \dots + F_n(1+i)^{-n}$$

Donde F es el flujo de caja e i es la tasa a la cual son descontados los flujos de caja, es decir, la TIO.

Se realizó la siguiente matriz. con el fin de mostrar los datos necesarios para el análisis.

Tabla 6. Matriz costo- beneficio.

| ALTERNATIVA       | A  |
|-------------------|----|
| Inversión Inicial | \$ |
| Beneficios        | \$ |
| VP                | \$ |
| VPN               | \$ |

Fuente: Autores

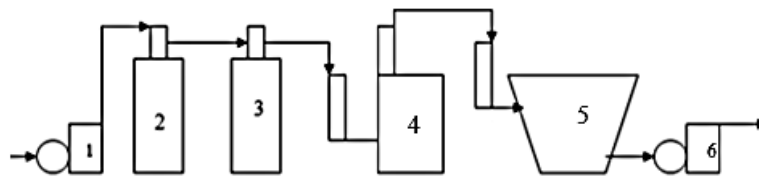


## FASE I: Diagnóstico

Con el fin de tener un contexto o línea base con la cual posibilitar el planteamiento de alternativas que den solución a la problemática y se adapten tanto económica como técnicamente a la empresa, se realizaron las actividades planteadas dentro de la metodología con las cuales fue posible obtener una visión más acertada de la empresa.

Con el fin de obtener agua con la calidad suficiente para la realización de sus productos químicos (como los refrigerantes automotrices) se solicitó un sistema de producción de agua con menos de 10 microsiemens a la empresa UNIVERSAL OSMOSIS; esta diseñó un sistema que combina varios métodos (Ilustración 2) para garantizar una conductividad inferior a la anotada y además estar libre de virus y bacterias.

**Ilustración 2. Diagrama del sistema implementado**



**Fuente:** (Universal Osmosis, 2019)

En el Manual de Equipo Ultralite 4.4K dado a la empresa por UNIVERSAL OSMOSIS, establece que,

### 1. Bomba de Re-presurización

Esta es una bomba centrífuga conectada a un tanque pulmón o hidroneumático llamado, sistema de presión constante, que se encarga de mantener una presión y un caudal adecuado de alimentación al sistema de ósmosis inversa, normalmente debe suministrar 10 Gal/min a una presión de 30 a 60 PSI. Esta presión y caudal

son requeridos como lo mínimo aceptable para que un sistema de ósmosis inversa pueda operar. (Universal Osmosis, 2019).

## **2. Filtro multimedia**

Está compuesto por un tanque en fibra de vidrio con una válvula automática y dentro del tanque se instalan varias capas de material filtrante como grava, gravilla, arena de dos tamaños y antracita. Estos medios filtrantes retienen los sólidos suspendidos que vienen en el agua y evitan el taponamiento prematuro de las membranas de ósmosis inversa. (Universal Osmosis, 2019).

## **3. Filtro carbón**

Está compuesto por un tanque en fibra de vidrio con una válvula automática y dentro del tanque se instalan varias capas de carbón activado de cáscara de coco para remover cloro, materia orgánica, color y olor que pudiera venir en el agua. Es importante la remoción del cloro puesto que las membranas de ósmosis inversa toleran menos de 0.1 mg/l de cloro residual, pues las hidroliza. (Universal Osmosis, 2019).

## **4. Sistemas de ósmosis inversa**

Este sistema está compuesto por un filtro de 5 micras que remueve los sólidos suspendidos que pudieran pasar del filtro multimedia, una válvula solenoide que solo abre cuando el sensor de presión certifica que esta se encuentra en por lo menos 30 PSI, una bomba de alta presión, encargada de enviar el agua entre 100 y 180 PSI a las membranas de ósmosis inversa, para producir agua de permeado. El equipo viene equipado con manómetros antes y después de filtros y antes y después de membranas para determinar las caídas de presión y así saber cuándo se deben lavar. (Universal Osmosis, 2019).

## 5. Tanque de almacenamiento

El agua es almacenada en un tanque de polietileno de alta densidad. Como esta agua es susceptible de contaminarse por organismos aerobios, el tanque debe permanecer cerrado. (Universal Osmosis, 2019).

## 6. Bomba de Re-presurización

Esta es una bomba centrífuga en acero inoxidable, encargada de mantener una presión y un caudal constantes del agua desmineralizada, para ser enviada a los sistemas de producción. (Universal Osmosis, 2019).

## Calidad del agua de alimentación

En cuanto a la calidad que requiere y debe cumplir el agua de alimentación del sistema para garantizar su correcto funcionamiento, así como para asegurar una mayor vida útil; los parámetros claves son los siguientes:

**Tabla 7. Parámetros agua de alimentación.**

|  |                                       |
|--|---------------------------------------|
| <b>Flujo mínimo de suministro de agua</b>    | 10 gal/min                            |
| <b>Presión mínima del suministro de agua</b> | 30 PSI                                |
| <b>Temperatura del suministro agua</b>       | 4 a 40°C                              |
| <b>Rango de pH</b>                           | 4 - 9                                 |
| <b>Dureza total</b>                          | Menor a 30 ppm como CaCO <sub>3</sub> |
| <b>Sólidos Disueltos Totales</b>             | <3000 mg/L                            |
| <b>Hierro</b>                                | <0.1 mg/L                             |
| <b>Cloro Libre</b>                           | <0.1 mg/L                             |
| <b>Manganeso</b>                             | <0.05 mg/L                            |
| <b>Orgánicos</b>                             | <1 mg/L                               |

**Fuente:** (Universal Osmosis, 2019)

### 1.1. Caracterización fisicoquímica

Para el análisis del agua que entra al proceso y la de rechazo generado por el sistema de ósmosis inversa se contrató el análisis de laboratorio ANALQUIM LTDA, esto con el fin de definir su calidad mediante la realización de diferentes pruebas.

En la tabla 8 y 13 se relacionan los parámetros que fueron medidos y sus respectivos resultados de acuerdo con el *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater* 23d Edition 2017.

*Tabla 8. Parámetros fisicoquímicos del afluente.*

| Agua Potable    |                              |                              |
|-----------------|------------------------------|------------------------------|
| Variable        | Técnicas de análisis         | Resultado                    |
| Cloruros        | Volumétrico                  | 17.3 mg /L Cl <sup>-</sup>   |
| Color Aparente  | Comparación visual           | < 5 UPC                      |
| Conductividad   | Electrometría                | 80.2 μS/cm a 25°C            |
| Dureza total    | Volumétrico                  | 17 mg/L                      |
| Hierro          | Espectrofotometría           | <0.10 mg/L                   |
| pH              | Electrométrico               | 6.63 Unidades                |
| Sólidos Totales | Gravimétrico- Secado a 105°C | 38 mg/L                      |
| Sulfatos        | Turbidímetro                 | < 10.0 mg /L SO <sub>4</sub> |
| Turbiedad       | Nefelométrico                | <0.30 UNT                    |

**Fuente:** Autores

Los parámetros que se midieron para el agua potable se encuentran en la tabla 8 estos se realizaron con el propósito de conocer la cantidad de sales, para posteriormente determinar que unidades y tipo de membrana sería la adecuada al momento de desmineralizar el agua que será utilizada para la fabricación de los refrigerantes.

Para los parámetros establecidos como importantes en el libro de Romero (2006), se tuvieron en cuenta las condiciones actuales del sistema, así como del agua de alimentación.

De igual forma se realizó la toma de tres muestras simples para los parámetros de pH y conductividad con ayuda del medidor HI9811-5 (para agua potable, agua de rechazo y el agua de proceso), los datos obtenidos se relacionan en las tablas presentadas a continuación.

**Tabla 9. Valores de conductividad y pH del Agua Potable.**

| <b>AGUA POTABLE</b>        |   |
|----------------------------|---|
| <b>pH</b> (unidades de pH) | <b>Conductividad</b> ( $\mu\text{S/cm}$ ) |
| 7.9                        | 60  |
| 7.8                        | 50  |
| 7.8                        | 60  |
| 7.3                        | 50  |
| 7.4                        | 60  |
| 7.3                        | 60  |

**Fuente:** Autores

**Tabla 10. Valores de conductividad y pH del agua de rechazo.**

| <b>AGUA DE RECHAZO</b>     |   |
|----------------------------|---|
| <b>pH</b> (unidades de pH) | <b>Conductividad</b> ( $\mu\text{S/cm}$ ) |
| 7.6                        | 160                                       |
| 7.7                        | 140                                       |
| 7.6                        | 150                                       |
| 7.3                        | 160                                       |
| 7.3                        | 140                                       |
| 7.3                        | 140                                       |

**Fuente:** Autores

Tabla 11. Valor de conductividad y pH del agua de proceso.

| AGUA DE PROCESO     |   |
|---------------------|---|
| pH (unidades de pH) | Conductividad ( $\mu\text{S}/\text{cm}$ ) |
| 7.0                 | 5   |

Fuente: Autores.

- **Sólidos disueltos totales (SDT):** Para calcular este parámetro se tuvo en cuenta los valores de conductividad presentes en la tabla 9, a partir de estos fue posible determinar el valor de conductividad promedio, con el cual, se estableció el valor de sólidos disueltos totales del agua de abastecimiento o potable.

$$\overline{EC} = \left( \frac{60+50+60+50+60+60}{6} \right) \mu\text{S}/\text{cm}$$

$$\overline{EC} = 56.66 \mu\text{S}/\text{cm}$$

Teniendo en cuenta que el factor de conversión de sólidos disueltos totales dado en las especificaciones del medidor HI9811-5 (tabla 4), se obtuvo que,

$$\text{Factor de conversion} = 0.5 \frac{\text{mg}}{\text{L}} = 1 \mu\text{S}/\text{cm}$$

$$SDT = 56.66 \mu\text{S}/\text{cm} * \frac{0.5 \text{ mg}/\text{L}}{1 \mu\text{S}/\text{L}}$$

$$SDT = 28.33 \text{ mg}/\text{L}$$

Ahora bien, para verificar el valor resultante se realizó una interpolación de los valores establecidos en la siguiente ilustración 3:

Ilustración 3. Constantes de sondas.

| Conductivity<br>(Micromhos/cm) | Resistivity<br>(Ohms-cm) | Dissolved Solids<br>(ppm) |
|--------------------------------|--------------------------|---------------------------|
| .056                           | 18,000,000               | .0277                     |
| .084                           | 12,000,000               | 0.417                     |
| .167                           | 6,000,000                | 0.833                     |
| 1.00                           | 1,000,000                | .500                      |
| 2.50                           | 400,000                  | 1.25                      |
| 20.0                           | 50,000                   | 10.0                      |
| 200                            | 5000                     | 100                       |
| 2000                           | 500                      | 1,000                     |
| 20,000                         | 50                       | 10,000                    |

Fuente: (Omega, s.f.)

La conductividad promedio obtenida durante el muestreo fue de 56,66  $\mu\text{S/cm}$ . Dentro de la ilustración anterior no se encuentra el valor correspondiente al valor hallado, por lo que es necesario interpolar entre los valores de 20  $\mu\text{S/cm}$  y 200  $\mu\text{S/cm}$ .

Tabla 12. Interpolación.

| <i>Conductivity</i> (micromhos/cm) | <i>Dissolved Solids</i> (ppm) |
|------------------------------------|-------------------------------|
| 20.0                               | 10.0                          |
| 56.66                              | x                             |
| 200                                | 100                           |

Fuente: Autores.

$$\frac{200 - 20}{200 - 56.66} = \frac{100 - 10}{100 - X}$$

$$1.25 = \frac{90}{100 - X}$$

$$1.25 * (100 - X) = 90$$

$$X = -\left(\frac{90}{1.25} - 100\right)$$

$$X = 28.33 \text{ mg/L}$$

Según los valores establecidos en el Manual Equipo Ultralite 4.4K (dado por la empresa Universal Osmosis a la empresa productora de refrigerantes automotrices para la correcta utilización del sistema de ósmosis inversa) la concentración de sólidos disueltos totales cumple con el índice de calidad del agua de alimentación establecido (<3000 mg/L), de igual manera este se encuentra dentro del valor de sólidos totales dados en el muestreo de laboratorio (38 mg/L).

- **Presión Neta:** Para calcular la presión neta se debe tener en cuenta la presión de abastecimiento que se presenta en la entrada de la membrana la cual es de 165,474 kPa y es proporcionada por una bomba centrífuga; la contrapresión que se presenta en la salida de la membrana es de 0 kPa y la presión osmótica la cual según Romero depende de la concentración de SDT en el agua, por lo que supone que en cada 100 mg/l de SDT, se producen 7 kPa (1 psi) y asimismo calcular la presión osmótica de la membrana la cual por cada 22,33 mg/l de SDT se producen 1,563 kPa (1 psi). Con los datos anteriormente mencionados del sistema se calcula la presión neta que sería:

**Presión neta** = *presión de abastecimiento – contrapresión – presión osmótica*

$$Presion Neta = 165.474 \text{ kPa} - 0 \text{ kPa} - \frac{(22.33)7}{100} = 163.91 \text{ kPa}$$



La presión neta es de gran importancia para el funcionamiento del sistema de ósmosis inversa ya que es directamente proporcional a la producción de agua del sistema, además la presión neta puede llegar afectar el porcentaje de rechazo de SDT.

- **Temperatura:** la temperatura del agua de alimentación se estableció de acuerdo a la temperatura ambiente la cual corresponde a 14°C.

Los parámetros analizados para el agua de rechazo por el laboratorio ANALQUIM LTDA son los mismos establecidos para el agua potable; los resultados se presentan en la tabla 13.

**Tabla 13. Parámetros fisicoquímicos del agua de rechazo del Sistema de ósmosis inversa**

| <b>Agua de rechazo</b> |                              |                              |
|------------------------|------------------------------|------------------------------|
| <b>Variable</b>        | <b>Técnicas de análisis</b>  | <b>Resultado</b>             |
| Cloruros               | Volumétrico                  | 38.7 mg /L                   |
| Color Aparente         | Comparación visual           | < 5 UPC                      |
| Conductividad          | Electrometría                | 194,4 $\mu$ S/cm a 25°C      |
| Dureza total           | Volumétrico                  | 53 mg/L                      |
| Hierro                 | Espectrofotometría           | 0.19 mg/L                    |
| pH                     | Electrométrico               | 6.68 Unidades                |
| Solidos Totales        | Gravimétrico- Secado a 105°C | 96 mg/L                      |
| Sulfatos               | Turbidímetro                 | < 10.0 mg SO <sub>4</sub> /L |
| Turbiedad              | Nefelométrico                | 0.65 UNT                     |

**Fuente:** Autores

Los datos relacionados en la tabla 13 son tomados con el propósito de conocer las características del agua de rechazo; estos parámetros se emplearán al momento de elegir las alternativas las cuales se escogen de acuerdo con el uso que se le logre establecer al agua de rechazo.

## 1.2. Tamaño y distribución de la empresa

Para la elaboración del *Layout* se tomaron las medidas correspondientes con ayuda de un medidor laser de distancias GLM 50C Professional de la marca BOSCH el cual cuenta con los siguientes datos técnicos.

**Tabla 14. Datos técnicos GLM 50C Professional.**

| <b>Datos Técnicos</b>               |                   |
|-------------------------------------|-------------------|
| Diodo Laser                         | 635 nm, <1mW      |
| Margen de medición                  | 0.05 – 50.00      |
| Exactitud medición habitual         | +/- 1.5 mm        |
| Margen de medición del inclinómetro | 0- 360° (4 x 90°) |
| Unidades de medida                  | m/cm, ft/in       |

**Fuente:** (BOSCH, s. f)

La empresa de refrigerantes cuenta con un área aproximada de 865 m<sup>2</sup> y está distribuida según como se muestra en el esquema elaborado. (ANEXO 1)

## 1.3. Balance Hídrico

El agua de alimentación aumenta su caudal y presión al pasar por el sistema de presión constante o Hidroneumático, encargado de enviar el agua a través de los filtros Multi Media y de Carbón Activado con un caudal de 26 L/min de agua potable; posteriormente el agua ingresa al equipo de ósmosis inversa (26 L/min) a través del filtro de sedimento de 5 micras; luego el agua entra a la bomba de alta presión multietapa, encargada de aumentar la presión hasta que el agua pase a través de las membranas y genere agua producto. (Universal Osmosis, 2019)

Para que la bomba multietapa aumente la presión, se debe ir cerrando lentamente la válvula reguladora que se encuentra en el tablero, hasta que en el flujómetro de agua producto la medida de caudal alcance los 3 gal/min. (Universal Osmosis, 2019)

Cuando se cumple con el caudal de agua producto, la presión del manómetro de la bomba de alta, debe estar entre 100 y 180 PSI. La presión es proporcional a la cantidad de Sólidos Disueltos que estén presentes en el agua de alimentación. (Universal Osmosis, 2019)

El agua producto pasa a través de un medidor de conductividad que indica la calidad de agua en micro siemens ( $<10 \mu\text{S}/\text{cm}$ ) con un caudal aproximado de 16 L/min. (Universal Osmosis, 2019)

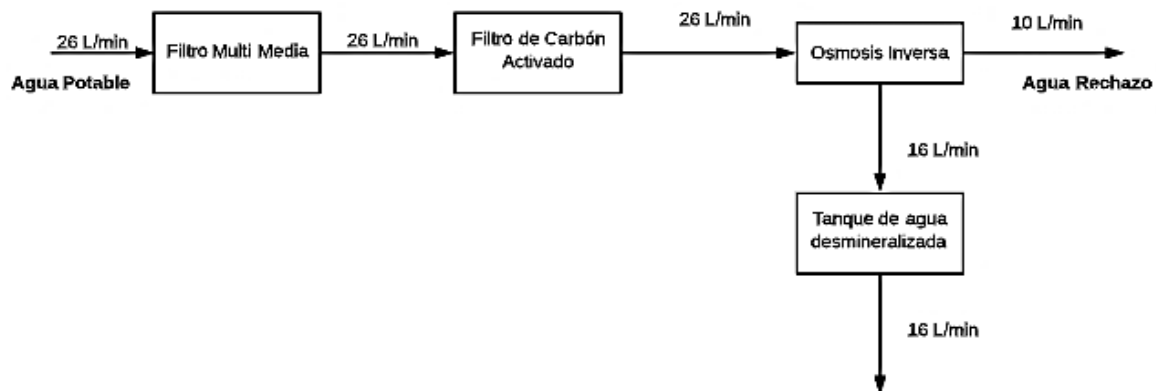
El sistema viene equipado con un sensor de presión en el agua de alimentación que evita que la bomba trabaje en vacío cuando se cae la presión de 30 PSI, trae una válvula solenoide que abre solo si se cumple el requisito de presión y viene un manómetro que indica la presión del agua en la entrada del sistema. (Universal Osmosis, 2019)

El motor del equipo viene conectado a un sensor de nivel de agua, de tal manera, que cuando el tanque de agua producto se llena, el equipo se apaga y cuando baja el nivel de agua de una altura determinada, el equipo arranca en forma automática. (Universal Osmosis, 2019)

El caudal requerido de agua producto para la elaboración de refrigerantes automotrices y demás productos químicos es de 20 L/min. (Universal Osmosis, 2019)

Para poder establecer los consumos que se llevan a cabo dentro de la empresa, se realizó un diagrama de bloques con el cual fuera posible identificar las unidades que son utilizadas dentro del proceso de producción de refrigerantes automotrices.

**Ilustración 4. Diagrama de bloques tratamiento de agua.**



**Fuente:** Autores.

Por otro lado, la empresa cuenta con dos baños de los cuales uno está designado para mujeres (cuenta con lavamanos y sanitario) y uno para hombres (lavamanos, orinal y sanitario); sin embargo, los consumos en estas áreas no son representativas.

Para el balance de materia se tomó el valor de SDT para facilitar su desarrollo; se toman los datos de la tabla 10 y 11 para determinar los valores de SDT correspondientes al agua de rechazo y al agua de proceso.

Para el agua de rechazo se tuvo una conductividad promedio de 148.33  $\mu\text{S}/\text{cm}$ , por lo que el valor de SDT es el siguiente,

$$\text{Factor de conversion} = 0.5 \frac{\text{mg}}{\text{L}} = 1 \mu\text{S}/\text{cm}$$

$$SDT = 148.33 \mu S/cm * \frac{0.5 mg/L}{1 \mu S/L}$$

$$SDT = 37.08 mg/L$$

En cuanto al agua de proceso su conductividad es de  $5 \mu S/cm$  por lo que su valor de SDT es de

$$\textbf{Factor de conversion} = 0.5 \frac{mg}{L} = 1 \mu S/cm$$

$$SDT = 5 \mu S/cm * \frac{0.5 mg/L}{1 \mu S/L}$$

$$SDT = 2.5 mg/L$$

Teniendo en cuenta que la Ley de la conservación de la masa dice que “la cantidad de masa-energía que manifiesta un determinado espacio-tiempo es constante en todo el universo” (Pública, s.f.). Por lo que dentro de este sistema se tiene que Entradas = Salidas

$$\textbf{Entradas} = \textbf{Salidas}$$

$$C_E * Q_E = (C_{AP} * Q_{AP}) + (C_{AR} * Q_{AR})$$

$$28.33 mg/L * 26 L/min = (2.5 mg/L * 16 L/min) + (74.14 mg/L * 10 L/min)$$

$$736.58 mg/min = (40 mg/min) + (741.4 mg/min)$$

$$736.58 mg/min = 781.4 mg/min$$

El porcentaje de error entre los dos valores fue de

$$\% \textbf{ERROR} = \frac{781.4 - 736.58}{781.4} * 100\%$$

$$\% \textit{ERROR} = 5.73\%$$

## **FASE II: Alternativas**

A partir del diagnóstico realizado durante la fase I, donde fue posible establecer un panorama del funcionamiento de la planta, así como, la calidad del agua potable (utilizada para el abastecimiento), del agua de proceso y de rechazo (producto del sistema de ósmosis inversa), es favorable plantear alternativas ajustables al objetivo del proyecto.

Según Metcalf & Eddy (1998), el uso de aguas residuales es un elemento importante en la planificación de los recursos, sin embargo, este sugiere la aplicación de otras alternativas como el ahorro del agua, el uso efectivo de los suministros existentes y el desarrollo de nuevas fuentes de recursos.

En Colombia, las estadísticas indican que apenas el 41% del agua residual que producimos es tratada, sin embargo, en cuanto a regulación ambiental este país dio un paso importante en su compromiso con el medio ambiente, a través de la resolución 1207 de 2014 que regula el reúso de aguas residuales tratadas y que puede ser considerado como un plan de reconversión a tecnologías limpias. (Rozo, 2015)

Por esta razón las empresas están obligadas a ser creativas en el manejo del agua que utilizan en sus plantas y operaciones, teniendo de esta forma una misión-oportunidad: encontrar alternativas de relacionar el compromiso ambiental a un beneficio económico para su organización, sus colaboradores y su entorno. (Rozo, 2015)

Por lo anterior algunas de las alternativas planteadas a continuación buscan el aprovechamiento del agua de rechazo producida en el sistema de ósmosis inversa dentro de la empresa de refrigerantes automotrices. Estas alternativas tienen un tiempo de desarrollo aproximado de tres años.

### **Alternativa 1: Agua de riego**

Metcalf & Eddy (1998) plantea siete categorías de reutilización de aguas residuales municipales, ordenadas en función del volumen de reutilización previsto. Las cuatro primeras categorías tienen un potencial de reutilización alto donde el riego agrícola y de espacios verdes ofrece importantes posibilidades de reutilización de las aguas residuales.

De acuerdo con la FAO (2012), la agricultura utiliza actualmente un 11 % de la superficie de las tierras del mundo para la producción agrícola, y representa el 70 % de las extracciones de agua, cifra que llega a un 95% en algunos países en desarrollo; por lo tanto, el aprovechamiento de aguas residuales se presenta como una alternativa para hacer frente a la creciente demanda del agua utilizada para riego, además, de ser una forma de reducir el impacto sobre el ambiente. Rodríguez et al. (2005).

En la Resolución 1207 de 2014 el uso agrícola está establecido como uno de los usos para agua residual tratada (Artículo 6) y de igual forma se establecen los criterios de calidad que esta debe cumplir previo a su uso. A partir de lo anterior se compararon las características del agua de rechazo que se obtiene del sistema de ósmosis inversa con la norma; esta comparación se muestra en la siguiente tabla.



Tabla 15. Criterios de calidad uso agrícola.

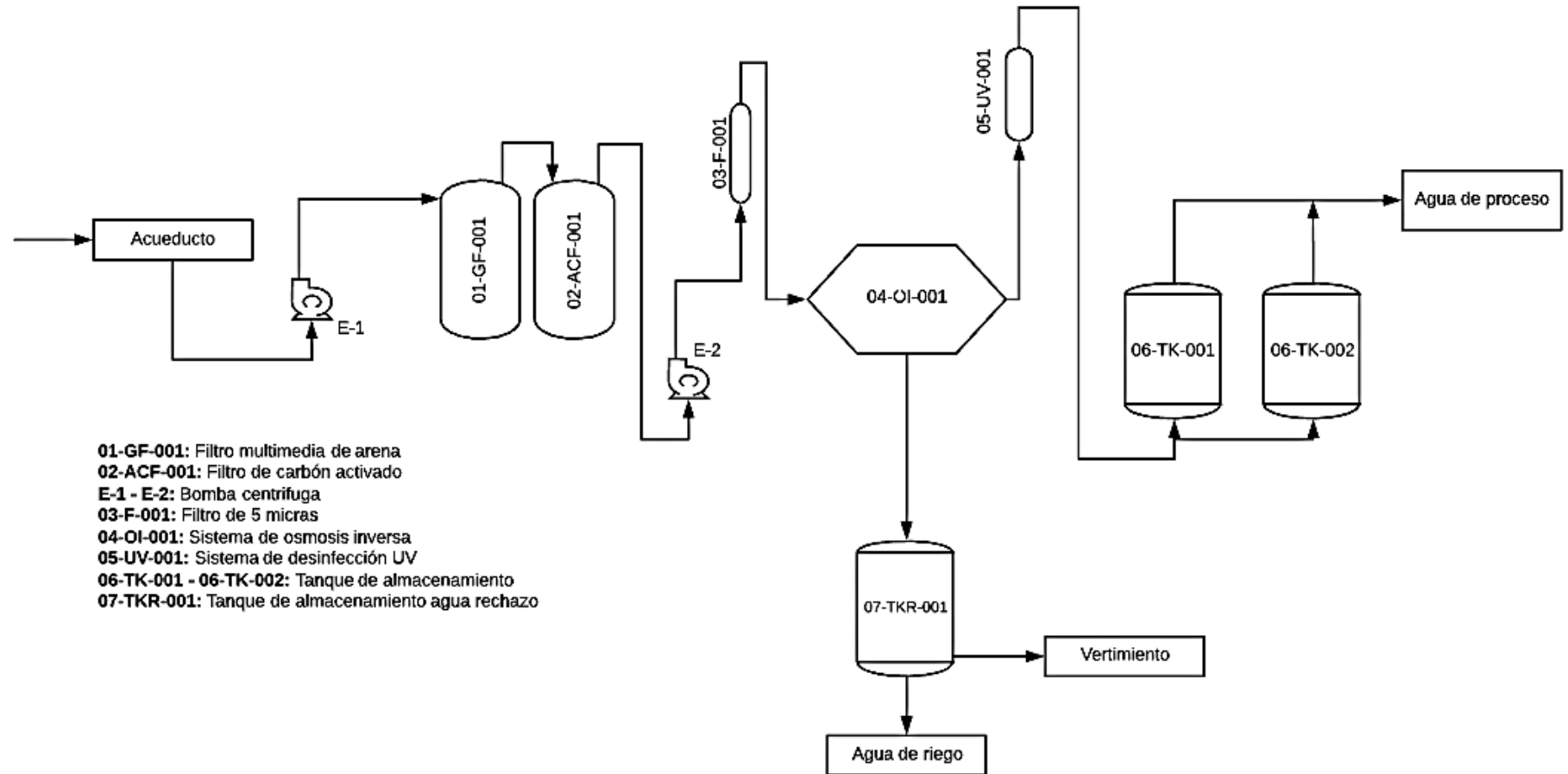
| Variable        | Unidad de medida | Res. 1207/2014<br>(Valor máx.<br>Permisible) | Agua de rechazo | Cumplimiento |
|-----------------|------------------|--|-----------------|--------------|
| Cloruros        | mg /L            | 300.0  | 38.7            | Sí           |
| Color Aparente  | UPC              | No aplica                                    | <5              | -            |
| Conductividad   | µS/cm            | 1500.0                                       | 194.4           | Sí           |
| Dureza total    | mg/L             | No aplica                                    | 53              | -            |
| Hierro          | mg /L            | 5.0  | 0.19            | Sí           |
| pH              | Unid. de pH      | 6.0 - 9.0                                    | 6.68            | Sí           |
| Solidos Totales | mg/L             | No aplica                                    | 96              | -            |
| Sulfatos        | mg /L            | 500.0  | < 10.0          | Sí           |
| Turbiedad       | UNT              | No aplica                                    | 0.65            | -            |

**Fuente:** Autores

A partir de los criterios de calidad que se mencionan en la tabla anterior, se determina que el agua de rechazo cumple con los valores máximos permisibles establecidos por la resolución de uso de aguas residuales tratadas; por lo tanto, esta alternativa es posible desarrollarla e implementarla en caso de ser seleccionada, no obstante, es necesario cumplir con otros requerimientos dados por esta resolución.

Dicho lo anterior, se procede a analizar la alternativa desde diferentes aspectos con el propósito de facilitar la evaluación de alternativas. Para empezar, se realizó un diagrama de flujo de proceso en el cual es posible observar las unidades requeridas y así mismo tener una representación esquemática de la alternativa al momento de operación; este incluye las unidades y dirección de flujo.

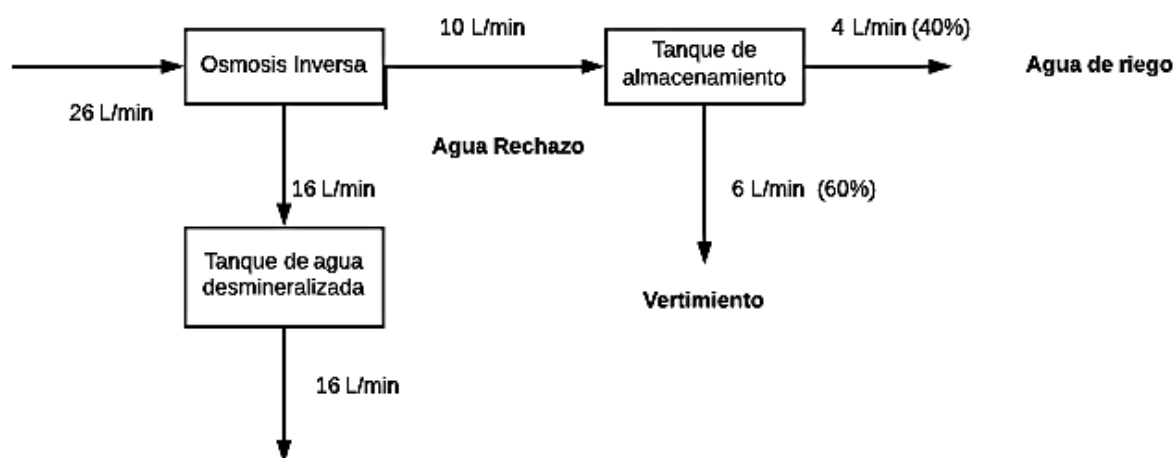
Ilustración 5. Diagrama de flujo de procesos de la alternativa 1.



Fuente: Autores

Acto seguido, se procedió a desarrollar el balance de materia para la alternativa según lo exigido por la Res. 1207 de 2014 en la cual se indica que “tanto el usuario generador como el usuario receptor deberán entregar a la autoridad ambiental competente los respectivos balances de materia o de masa en términos de las cantidades de agua en su sistema, en el marco del trámite de la concesión de aguas y/o del permiso de vertimientos. (...) El balance de materia o de masa, tanto para el usuario generador como para el usuario receptor, debe satisfacer la ley de conservación de la materia o de la masa.”

**Ilustración 6. Balance de materia por caudales, alternativa 1.**



**Fuente:** Autores.

En la ilustración 6, se presenta el diagrama de bloques realizado para la alternativa, con el propósito de facilitar el desarrollo del balance de materia, especificando las variables disponibles y siguiendo la Ley de Conservación de la masa (Entradas = Salidas). Este balance se realizó mediante el análisis de los caudales.

La ecuación general para este balance se presenta a continuación, demostrando que para esta alternativa la entrada es igual a las salidas.

$$\textit{Agua de Rechazo} = \textit{Agua de riego} + \textit{Vertimiento}$$

$$Q_E = Q_R + Q_V$$

$$10\text{ L/min} = 4\text{ L/min} + 6\text{ L/min}$$

$$10\text{ L/min} = 10\text{ L/min}$$

Para la aplicación de la alternativa es necesario tener en cuenta el listado de cada uno de los equipos que se requieren para la aplicación de esta, teniendo en cuenta no solo los requerimientos establecidos en la Res. 1207 de 2014, donde “el usuario generador deberá instalar en el punto de entrega los elementos de control que permita conocer en cualquier momento la cantidad (caudal o volumen) de agua residual tratada que se está entregando para el reusó”, sino los necesarios para su operación. Este listado cuenta con el nombre del equipo, así como, cantidades requeridas, y valores unitarios.

Tabla 16. Listado de insumos requeridos para la alternativa 1.

| Insumo                                       | Cantidad | Marca        | Valor (c/u) |
|--|----------|--------------|-------------|
| Medidor de flujo                             | 1        | Digiten<br>G | \$ 120.000  |
| Medidor de Presión                           | 1        | Telsa        | \$165.000   |
| Tubería PVC 1/2 por 6 metros                 | 2        | Pavco        | \$20.000    |
| Válvulas Mariposa                            | 3        | Bray         | \$ 19.600   |
| Tanque de almacenamiento 10 m <sup>3</sup> . | 1        | Rotoplast    | \$6.510.700 |
| Soldadura PVC                                | 1        | Pavco        | \$49.900    |
| Removedor                                    | 1        | Pvc          | \$84.900    |
| Soldadura                                    | 25 Kg    |              | \$9.000     |

Fuente: Autores.

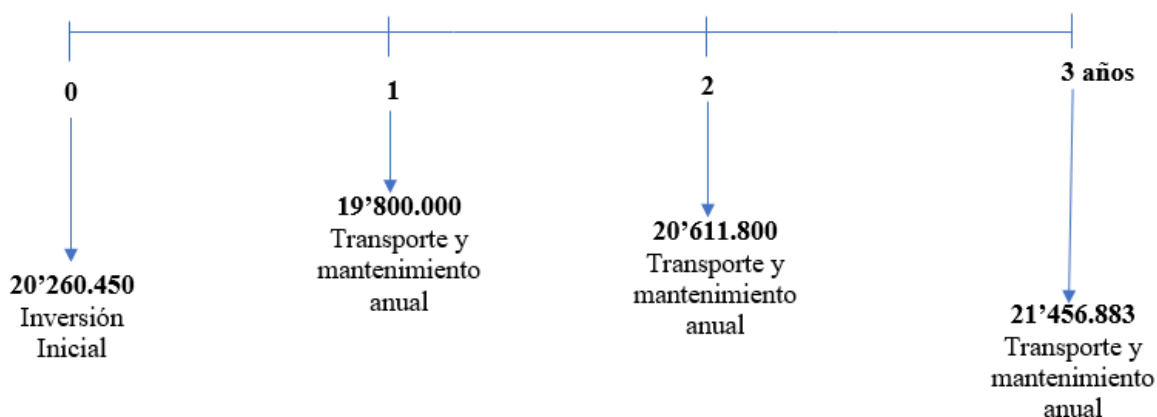
Después de seleccionar y listar los equipos, se procedió a elaborar una lista de costos, los cuales tienen como finalidad tener una aproximación a los recursos financieros para con ello determinar la factibilidad económica de la alternativa.

Primero se elaboró un presupuesto con los equipos y accesorios los cuales cuentan con su respectiva marca y valor unitario como se muestra en la tabla 16.

Para el cálculo del valor presente neto se utiliza la fórmula establecida por Baca (2000). De igual forma, se adaptó la convención donde la línea horizontal representa el tiempo en

la cual se establecen las fechas y los periodos de tiempo (para este proyecto fue de tres años); de esta línea de tiempo salen flechas hacia arriba y otras hacia abajo, las que están hacia abajo representan los egresos y la inversión inicial de esta alternativa; la línea de tiempo para esta alternativa es la siguiente:

**Ilustración 7. Flujo de caja alternativa 1.**



**Fuente:** Autores.

El valor presente neto para esta alternativa se calcula con la siguiente ecuación, donde  $F$  es el capital inicial más los intereses, es decir, el valor futuro;  $i$  es la tasa de interés utilizada para este proyecto se tuvo en cuenta el interés bancario de referencia (IBR), que es una tasa de interés de referencia de corto plazo denominada en pesos colombianos, que refleja el precio al que los bancos están dispuestos a ofrecer o a captar recursos en el mercado monetario. (Banco de la República, s. f)

Dentro de esta alternativa no se encuentra ningún tipo de ingresos o valores positivos, esto debido a que dentro la Res. 1207 de 2014 en su artículo 3°, parágrafo 1° dice que “en ningún caso el usuario generador puede cobrar por las cantidades (volúmenes) de agua residual tratadas entregadas al usuario receptor”, por lo que no habrá ingresos por su entrega y posterior reutilización.

$$VPN = \sum F_n(1+i)^{-n} = F_0 + F_1(1+i)^{-1} + F_2(1+i)^{-2} + \dots + F_n(1+i)^{-n}$$

$$VPN = -20'260650 - 19'800000(1 + 0.041)^{-1} - 20'611800(1 + 0.041)^{-2} \\ - 21'456883(1 + 0.041)^{-3}$$

$$VPN = -77'320968$$

Al presentar esta alternativa un valor de  $VPN < 0$  indica que esta no es factible desde el punto de vista económico, ya que, a lo largo de su utilización no se recupera la inversión inicial y se generan pérdidas económicas; esto se debe a la ausencia de fuentes de ingresos derivadas del agua de riego como fue mencionado anteriormente.

El porcentaje de agua de rechazo tomado para el agua de riego es de aproximadamente un 40%, debido a que la empresa no cuenta con la infraestructura adecuada para el almacenamiento de la totalidad del agua; teniendo en cuenta que para esta alternativa es necesario adquirir estructuras para almacenar el agua de riego cuyo caudal es de  $0.24 \text{ m}^3/\text{h}$  (volumen semanal de  $9.6 \text{ m}^3$ ), se requieren dos tanques con una capacidad de  $10 \text{ m}^3$ , los cuales serán desocupados una vez por semana.

El agua de riego será recogida dos veces al mes por un carro tanque con una capacidad de almacenamiento de  $14 \text{ m}^3$  por viaje, con un costo aproximado de \$800.000 COP.

*Tabla 17. Análisis de costos preliminar*

| <b>Análisis preliminar de costos Alternativa 1</b> |               |                          |
|--|---------------|--------------------------|
| <b>CAPEX</b>                                       | Compras       | \$13.765.000 COP         |
|  | Instalación   | \$6.495.450 COP          |
|  | $\Sigma$      | <b>\$ 20.260.450 COP</b> |
| <b>OPEX</b>  | Operación     | \$600.000 COP            |
|  | Químicos      | \$0 COP                  |
|  | Mantenimiento | \$19.200.000 COP         |
|  | $\Sigma$      | <b>\$19.800.000 COP</b>  |
| <b>VPN</b>   |               | <b>\$-77'320.968</b>     |
| <b>Payback</b>                                     |               | 0                        |

**Fuente:** Autores.

En la tabla anterior se realiza un análisis preliminar de costos la cual muestra los valores del CAPEX (inversión de capital para instalación y equipos), OPEX (costos asociados al mantenimiento y operación) y un Payback (tasa de retorno) asociados a la posible implementación de la alternativa. En el **ANEXO 2** se muestran estos ítems de forma más detallada.

A continuación, se realizó una evaluación de los riesgos asociados a la implementación de esta alternativa mencionados en la tabla 18 mediante el uso de una matriz probabilidad impacto (ilustración 8) tomada del PMBOK.



Ilustración 8. Matriz P&amp;I alternativa 1.

|              |     | Amenazas |      |      |      |      | Oportunidades |      |      |      |      |
|--------------|-----|----------|------|------|------|------|---------------|------|------|------|------|
| Impacto      | 0,9 | 0,09     | 0,27 | 0,45 | 0,63 | 0,81 | 0,81          | 0,63 | 0,45 | 0,27 | 0,09 |
|              | 0,7 | 0,07     | 0,21 | 0,35 | 0,49 | 0,63 | 0,63          | 0,49 | 0,35 | 0,21 | 0,07 |
|              | 0,5 | 0,05     | 0,15 | 0,25 | 0,35 | 0,45 | 0,45          | 0,35 | 0,25 | 0,15 | 0,05 |
|              | 0,3 | 0,03     | 0,09 | 0,15 | 0,21 | 0,27 | 0,27          | 0,21 | 0,15 | 0,09 | 0,03 |
|              | 0,1 | 0,01     | 0,03 | 0,05 | 0,07 | 0,09 | 0,09          | 0,07 | 0,05 | 0,03 | 0,01 |
|              |     | 0,1      | 0,3  | 0,5  | 0,7  | 0,9  | 0,9           | 0,7  | 0,5  | 0,3  | 0,1  |
| Probabilidad |     |          |      |      |      |      |               |      |      |      |      |

■ = Prioridad Alta

■ = Prioridad Media

■ = Prioridad Baja

**Fuente:** Guía de los Fundamentos de la Dirección de Proyectos. (2013)

A continuación, se presentan los riesgos con su respectiva valoración según su impacto y probabilidad de ocurrencia.

Tabla 18. Evaluación de riesgos.

| Riesgo                             | *P  | *I  | Valoración  | Riesgo             |               |                |               |                   |
|------------------------------------|-----|-----|-------------|--------------------|---------------|----------------|---------------|-------------------|
|                                    |     |     |             | Muy bajo<br>(0.05) | Bajo<br>(0.1) | Medio<br>(0.2) | Alto<br>(0.4) | Muy Alto<br>(0.8) |
| Disminución<br>calidad del<br>agua | 0,1 | 0,1 | <b>0,01</b> | X                  |               |                |               |                   |
| Impactos<br>ambientales            | 0,1 | 0,3 | <b>0,03</b> | X                  |               |                |               |                   |
| Pérdidas<br>económicas             | 0,9 | 0,5 | <b>0,45</b> |                    |               |                | X             |                   |

\*Probabilidad de ocurrencia

\*Impacto

**Fuente:** Autores.

Cabe señalar que dentro de los riesgos asociados a la aplicación de esta alternativa se puede encontrar los impactos causados al ambiente como por ejemplo, afectaciones en la salud humana, contaminación del suelo y los cuerpos de agua superficiales/ subterráneos a

los que pueda llegar las aguas de reusó (Dueñas, Amaya y Donado, 2015); sin embargo, de acuerdo con la FAO (2013) “el agua regenerada puede ofrecer una fuente de agua para promover el crecimiento en regiones con escasez de agua y para aumentar los ingresos de agricultores de zonas periurbanas o urbanas con pocos recursos”, además de que uno de los posibles beneficios, puede ser una menor extracción de ríos o acuíferos, o una menor contaminación de las aguas causada por los vertidos de aguas residuales.

Es posible señalar que, en esta alternativa no se evidencien cambios en la calidad de los productos realizados por la empresa, ya que, en ninguna etapa de la implementación de reutilización del agua de rechazo se ve comprometido el proceso productivo. Por último, al implementar esta alternativa no se aumentará el consumo energético de la empresa, gracias a que no se instalará ningún equipo que requiera energía eléctrica.

### **Alternativa 2: Recirculación y descarga de aparatos sanitarios**

Para la FAO (2013) los proyectos de reutilización del agua pueden ofrecer un doble o incluso triple “dividendo”, para los usuarios urbanos, agricultores y el medioambiente. En situaciones críticas de estrés hídrico, el uso de agua regenerada debe considerarse como una opción, donde el rechazar la opción de la reutilización podría ser muy costoso.

Metcalf & Eddy (1998) al plantear las siete categorías de reutilización de aguas residuales municipales establecen que el segundo gran uso de aguas residuales recuperadas se produce en actividades industriales, las cuales presentan gran variedad siendo uno de estos la descarga de aparatos sanitarios.

En la Resolución 1207 de 2014 el uso industrial para descarga de aparatos sanitarios está establecido como uno de los usos para agua residual tratada mencionados en su artículo 6, dentro del cual se establecen criterios de calidad que deben cumplir previo a su uso. A

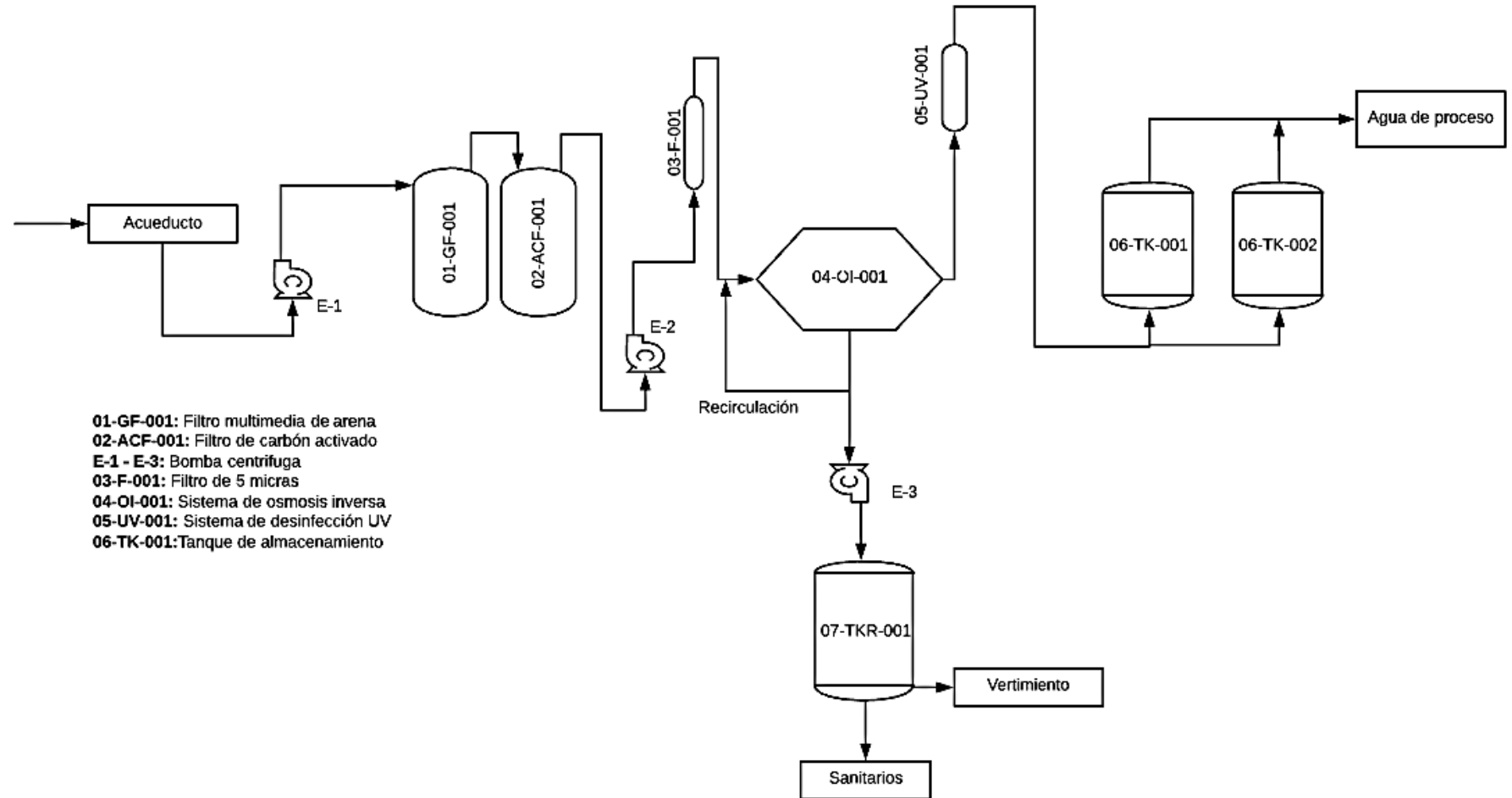
partir de lo anterior se compararon las características del agua de rechazo que se obtiene del sistema de ósmosis inversa con la norma; esta comparación se muestra en la siguiente tabla.

**Tabla 19. Criterios de calidad uso en descarga de aparatos sanitarios.**

| <b>Variable</b> | <b>Unidad de medida</b> | <b>Res. 1207/2014<br/>(Valor máx.<br/>Permisible)</b> | <b>Agua de rechazo</b> | <b>Cumplimiento</b> |
|-----------------|-------------------------|---|------------------------|---------------------|
| Cloruros        | mg /L                   | No aplica   | 38.7                   | -                   |
| Color Aparente  | UPC                     | No aplica   | <5                     | -                   |
| Conductividad   | μS/cm                   | No aplica   | 194.4                  | -                   |
| Dureza total    | mg/L                    | No aplica   | 53                     | -                   |
| Hierro          | mg /L                   | No aplica   | 0.19                   | -                   |
| Ph              | Und. De Ph              | 6.0 – 9.0   | 6.68                   | Sí                  |
| Solidos Totales | mg/L                    | No aplica   | 96                     | -                   |
| Sulfatos        | mg /L                   | No aplica   | < 10.0                 | -                   |
| Turbiedad       | UNT                     | No aplica   | 0.65                   | -                   |

**Fuente:** Autores.

Ilustración 9. Diagrama de flujo de proceso alternativa 2.



Fuente: Autores

Dicho lo anterior, se procede a analizar la alternativa desde diferentes aspectos con el propósito de facilitar la evaluación de alternativas. Se realizó un diagrama de flujo de proceso (ilustración 9) en el cual es posible observar las unidades requeridas y así mismo tener una representación esquemática de la alternativa al momento de operación; este incluye las unidades y dirección de flujo.

Para poder calcular el caudal necesario para abastecer la descarga de aparatos sanitarios, se tuvo en cuenta que la empresa tiene alrededor de quince trabajadores (incluye tanto el área administrativa como la operativa), por cada descarga el sanitario utiliza aproximadamente 6 LPF, igualmente se asumió que los trabajadores hacen uso de estos aproximadamente cuatro veces durante su jornada laboral.

$$\text{Caudal descarga} = 6 \frac{L}{\text{Flush}} * 4 \frac{\text{Flush}}{\text{dia} * \text{persona}} * 15 \text{ personas}$$

$$\text{Caudal de descarga} = 360 \frac{L}{\text{dia}} = 0.75 \text{ L/min} = 0.0125 \text{ L/s}$$

A continuación, se calculó el caudal máximo diario y máximo horario teniendo en cuenta la tabla 23 de la resolución 0330 de 2017, en la cual se establecen los factores pico para caudales de tratamiento de aguas residuales de la siguiente forma,

**Tabla 20. Factores pico para caudales de tratamiento de aguas residuales, RAS 2017**

| <b>Rango de caudal (L/s)</b> | <b>Factor máximo horario</b> | <b>Factor máximo diario</b> |
|------------------------------|------------------------------|-----------------------------|
| 0-10                         | 4                            | 3                           |

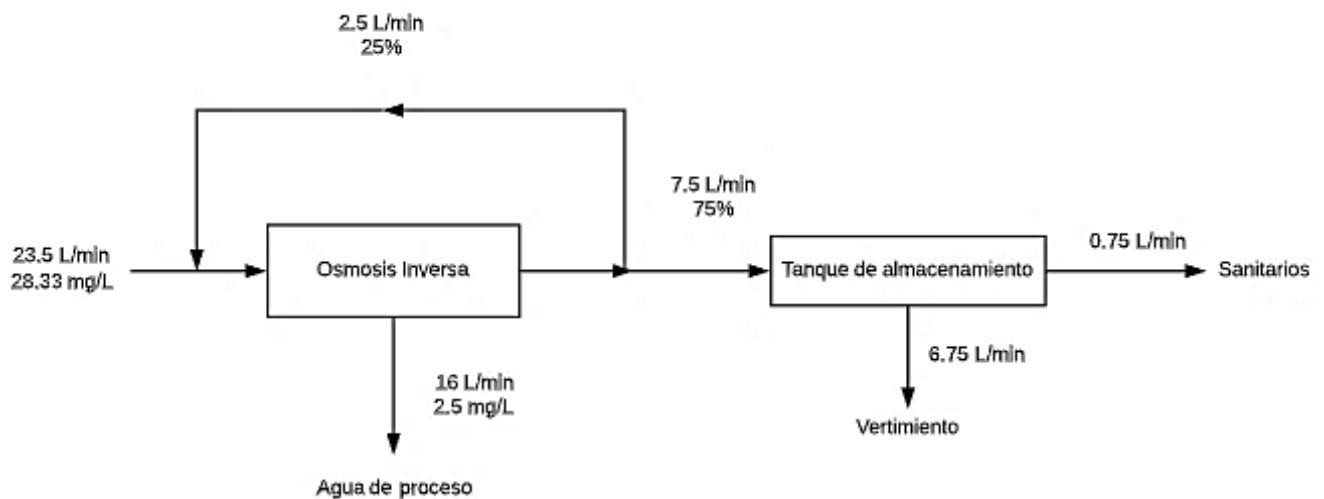
**Fuente:** Res. 0330 de 2017

$$Q_{\text{máx diario}} = 3 * 0.0125 \text{ L/s} = 0.0375 \text{ L/s}$$

$$Q_{\text{máx horario}} = 4 * 0.0125 \text{ L/s} = 0.05 \text{ L/s}$$

A continuación, se realizó un balance de materia con el cual será posible establecer un acercamiento al posible comportamiento del proceso cuando se desarrolla la implementación de esta alternativa, dentro de la cual se realiza una recirculación justo después de salir del sistema para nuevamente ingresar junto con el caudal de entrada del sistema de ósmosis inversa.

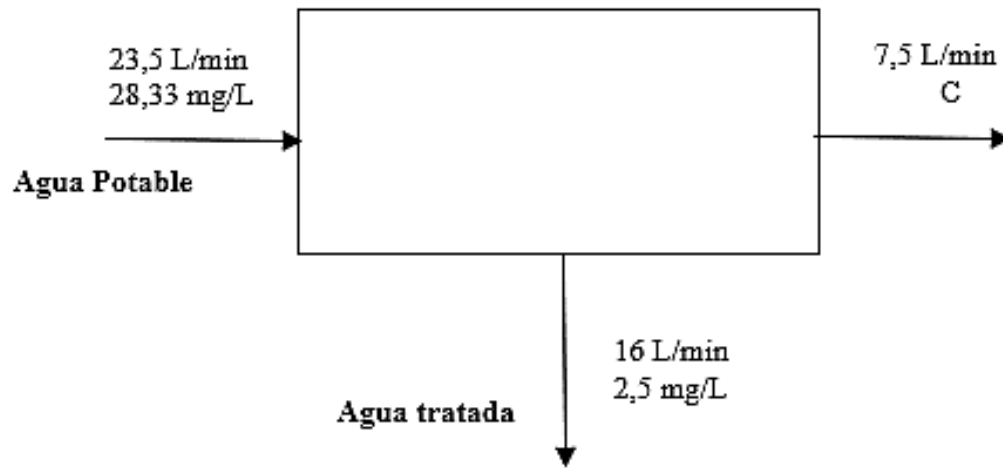
**Ilustración 10. Diagrama de bloques alternativa 2.**



**Fuente:** Autores.

Para poder realizar este balance fue necesario por medio de la aplicación de cajas negras con el fin de simplificar el proceso, como se muestra en la ilustración 11.

Ilustración 11. Balance de materia para hallar C.



Fuente: Autores.

Para poder hallar el valor correspondiente a la incógnita C, se realiza el siguiente procedimiento.

$$\textit{Entradas} = \textit{Salidas}$$

$$\textit{Agua Potable} = \textit{Agua tratada} + \textit{Agua de rechazo}$$

$$Q_E * C_E = Q_{AT} * C_{AT} + Q_{AR} * C_{AR}$$

$$23,5 * 28,33 = (16 * 2,5) + (7,5 * C)$$

$$665,75 = 40 + 7,5C$$

$$C = \frac{665,74 - 40}{7,5}$$

$$C = 83,43 \text{ mg/L}$$

Al emplear las aguas de rechazo del sistema de ósmosis inversa como aguas reutilizadas o de reciclaje, desciende el consumo de recursos hídricos de la empresa para la elaboración de sus productos químicos, ya que al recircular dentro del sistema el 25% del agua de rechazo y enviar el 7.5% del mismo como descarga de sanitarios, se disminuye el consumo de agua potable proveniente del acueducto en 2,75 L/min.

Después de efectuar el balance y analizar el comportamiento que tendrá el sistema con la recirculación, se procede a realizar un listado de equipos donde se identifica la cantidad necesaria y el valor unitario. Lo anterior nos suministró un estimado de los recursos que se requieren para la alternativa.

**Tabla 21. Listado de equipos requeridos para la alternativa 2.**

| <b>Insumo</b>                    | <b>Cantidad</b> | <b>Marca</b> | <b>Valor (c/u)</b> |
|----------------------------------|-----------------|--------------|--------------------|
| Medidor de flujo                 | 2               | Amspa        | \$ 393.000         |
| Bomba Centrifuga<br>+ Accesorios | 1               | Pedrollo     | \$3.149.900        |
| Tubería PVC ½                    | 1               | Pavco        | \$20.000           |
| Válvulas Mariposa                | 3               | Bray         | \$ 19.600          |
| Soldadura PVC                    | 2               | Pavco        | \$49.900           |
| Removedor                        | 1               | Pvc          | \$84.900           |
| Soldadura                        | 25 Kg           |              | \$9000             |

**Fuente:** Autores.

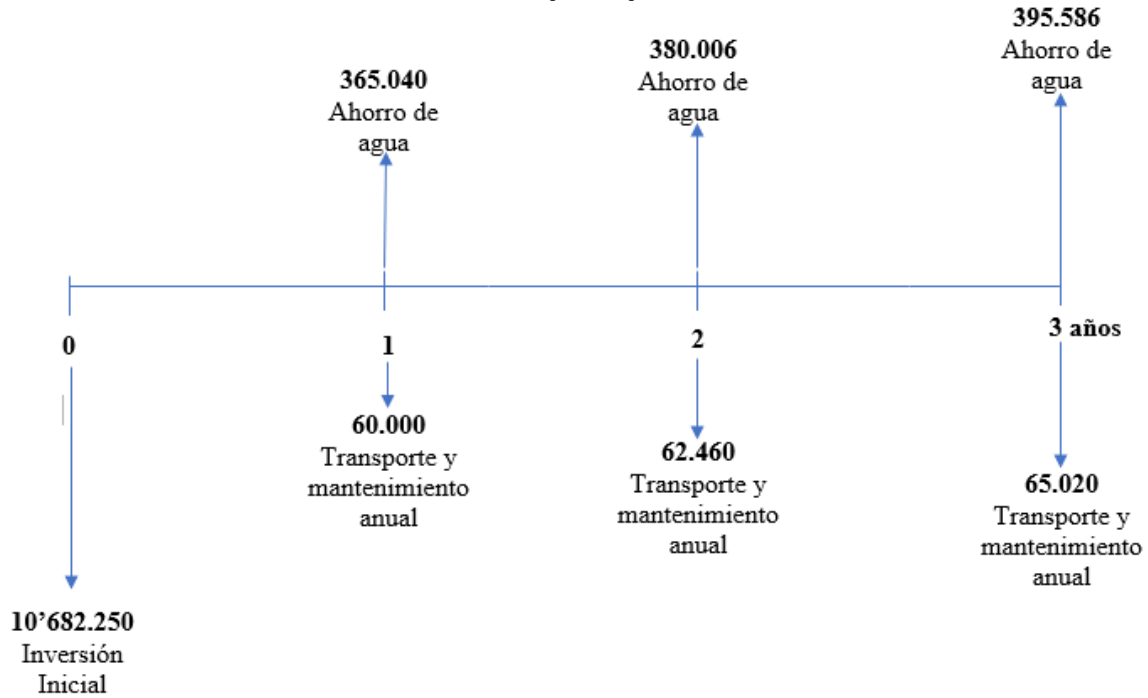
Luego de determinar los equipos necesarios se elabora un análisis preliminar el cual permite evaluar los costos con los posibles beneficios que este puede dar a la empresa, además de examinar un valor estimado de la inversión que se realizaría.



La empresa de servicios paga un aproximado de 1.300 COP/m<sup>3</sup> de agua potable proveniente del acueducto generando un costo aproximado de 486.720 COP por los 26 L/min utilizados en el proceso productivo, sin embargo, con la implementación de esta alternativa existe una disminución en el costo de este servicio de aproximadamente 60.840 COP de manera bimensual (365.040 COP anuales), que incluye no solo los 2,5 L/min de agua a recircular (46.800 COP) si no los 0,75 L/min de agua que será utilizada para la descarga de aparatos sanitarios (14.040 COP).

Para el cálculo del valor presente neto se utiliza la fórmula establecida por Baca (2000), tal como fue establecida en la alternativa anterior. Igualmente, se adaptó la convención donde la línea horizontal representa el tiempo (para este proyecto fue de tres años); de esta línea de tiempo salen flechas hacia arriba y otras hacia abajo, las que están hacia arriba representan los ingresos y las que están hacia abajo representan los egresos; la línea de tiempo para esta alternativa es la siguiente:

Ilustración 12. Flujo de caja alternativa 2.



Fuente: Autores

El valor presente neto para esta alternativa se calcula con la siguiente ecuación, donde F es el capital inicial más los intereses, es decir, el valor futuro; i es la tasa de interés utilizada para este proyecto se tuvo en cuenta el interés bancario de referencia (IBR), que es una tasa de interés de referencia de corto plazo denominada en pesos colombianos, que refleja el precio al que los bancos están dispuestos a ofrecer o a captar recursos en el mercado monetario. (Banco de la República, s. f)

$$\begin{aligned}
 VPN = & [-10'682.250 - 60000(1 + 0.041)^{-1} - 62460(1 + 0.041)^{-2} \\
 & - 65020(1 + 0.041)^{-3}] \\
 & + [365040(1 + 0.041)^{-1} + 380006(1 + 0.041)^{-2} \\
 & + 395586(1 + 0.041)^{-3}]
 \end{aligned}$$

$$VPN = -9'803172$$

A continuación, se realiza un análisis preliminar de costos la cual muestra los valores del CAPEX (inversión de capital para instalación y equipos), OPEX (costos asociados al mantenimiento y operación) y un Payback (tasa de retorno),

**Tabla 22. Análisis preliminar de costos para la Alternativa 2**

| <b>Análisis preliminar de costos Alternativa 2</b> |             |                         |
|--|-------------|-------------------------|
| <b>CAPEX</b>                                       | Compras     | \$4.434.400 COP         |
|  | Instalación | \$6.247.850 COP         |
|  | $\Sigma$    | <b>\$10.682.250 COP</b> |
| <b>OPEX</b>  | Operación   | \$60.000 COP            |
|  | Químicos    | \$0 COP                 |
|  | Disposición | \$0 COP                 |
|  | $\Sigma$    | <b>\$60.000 COP</b>     |
| <b>VPN</b>   |             | <b>\$-9'803.172</b>     |
| <b>Payback</b>                                     |             | 28 meses                |

**Fuente:** Autores

Dentro del **ANEXO 3** se encuentra con mayor detalle el presupuesto preliminar para esta alternativa, donde se especifican los insumos y mano de obra requeridos con mayor detalle, además se establecen los costos por operación y mantenimiento preventivo que se debe realizar a los tanques de almacenamiento; es necesario aclarar que estos tanques requieren de un lavado y desinfección de tres veces al año para garantizar la calidad de agua que se almacena.

A continuación, se realizó una evaluación de los riesgos asociados a la implementación de esta alternativa mencionados en la tabla 23 mediante el uso de una matriz probabilidad impacto (ilustración 13) tomada del PMBOK.

Ilustración 13. Matriz P&I para alternativa 2.

|         |     | Amenazas |      |      |      |      |              | Oportunidades |      |      |      |      |  |
|---------|-----|----------|------|------|------|------|--------------|---------------|------|------|------|------|--|
| Impacto | 0,9 | 0,09     | 0,27 | 0,45 | 0,63 | 0,81 |              | 0,81          | 0,63 | 0,45 | 0,27 | 0,09 |  |
|         | 0,7 | 0,07     | 0,21 | 0,35 | 0,49 | 0,63 |              | 0,63          | 0,49 | 0,35 | 0,21 | 0,07 |  |
|         | 0,5 | 0,05     | 0,15 | 0,25 | 0,35 | 0,45 |              | 0,45          | 0,35 | 0,25 | 0,15 | 0,05 |  |
|         | 0,3 | 0,03     | 0,09 | 0,15 | 0,21 | 0,27 |              | 0,27          | 0,21 | 0,15 | 0,09 | 0,03 |  |
|         | 0,1 | 0,01     | 0,03 | 0,05 | 0,07 | 0,09 |              | 0,09          | 0,07 | 0,05 | 0,03 | 0,01 |  |
|         |     | 0,1      | 0,3  | 0,5  | 0,7  | 0,9  | Probabilidad |               |      |      |      |      |  |

  = Prioridad Alta  
  = Prioridad Media  
  = Prioridad Baja

**Fuente:** Guía de los Fundamentos de la Dirección de Proyectos. (2013)

A continuación, se presentan los riesgos con su respectiva valoración según su impacto y probabilidad de ocurrencia.

Tabla 23. Evaluación de riesgos alternativa 2.

| Riesgo                       | *P  | *I  | Valoración | Riesgo             |               |                |               |                   |
|------------------------------|-----|-----|------------|--------------------|---------------|----------------|---------------|-------------------|
|                              |     |     |            | Muy bajo<br>(0.05) | Bajo<br>(0.1) | Medio<br>(0.2) | Alto<br>(0.4) | Muy Alto<br>(0.8) |
| Disminución calidad del agua | 0,5 | 0,3 | 0,15       |                    | X             |                |               |                   |
| Impactos ambientales         | 0,1 | 0,3 | 0,03       | X                  |               |                |               |                   |
| Pérdidas económicas          | 0,3 | 0,1 | 0,03       | X                  |               |                |               |                   |

\*Probabilidad de ocurrencia

\*Impacto

**Fuente:** Autores.

Los riesgos asociados a la aplicación de esta alternativa dependen del funcionamiento del sistema, por lo tanto, si se presenta algún error o deterioro de las membranas los costos en mantenimiento aumentan para la empresa. Con respecto a los impactos que puede ocasionar al ambiente estos se establecen de acuerdo con las actividades que realicen por ejemplo los vertimientos que provocan contaminación en los cuerpos de agua aledaños.

### **Alternativa 3: Evaporización y cristalización**

Tuset (s, f) dice que los efluentes salinos deben ser correctamente gestionados porque su descarga no controlada puede causar un elevado impacto ambiental, de igual forma es necesario tener en cuenta que esta gestión no siempre es sencilla y la opción más idónea depende siempre de una larga lista de factores, como caudal, concentración, situación geográfica, disponibilidad de fuentes residuales de energía, etc. Entre las opciones posibles de gestión de las salmueras, no cabe duda de que la más sostenible ambientalmente consiste en abordar su tratamiento, sin embargo, las técnicas convencionales como los tratamientos fisicoquímicos y biológicos no son viables para tratar este tipo de efluentes.

Actualmente, la industria presenta tecnologías para tratar efluentes con altos contenidos de sal más eficaces que las convencionales como lo son los evaporadores y cristalizadores; estos permiten tratar una corriente residual acuosa de forma eficiente, sencilla y sin utilización de reactivos. Tuset (s, f)

La evaporación de aguas residuales es una técnica utilizada desde hace varios años para reducir el porcentaje de agua presente en los residuos. La evaporación se está considerando como un proceso alternativo en un número creciente de aplicaciones de tratamiento de aguas residuales. Tuset (s, f)

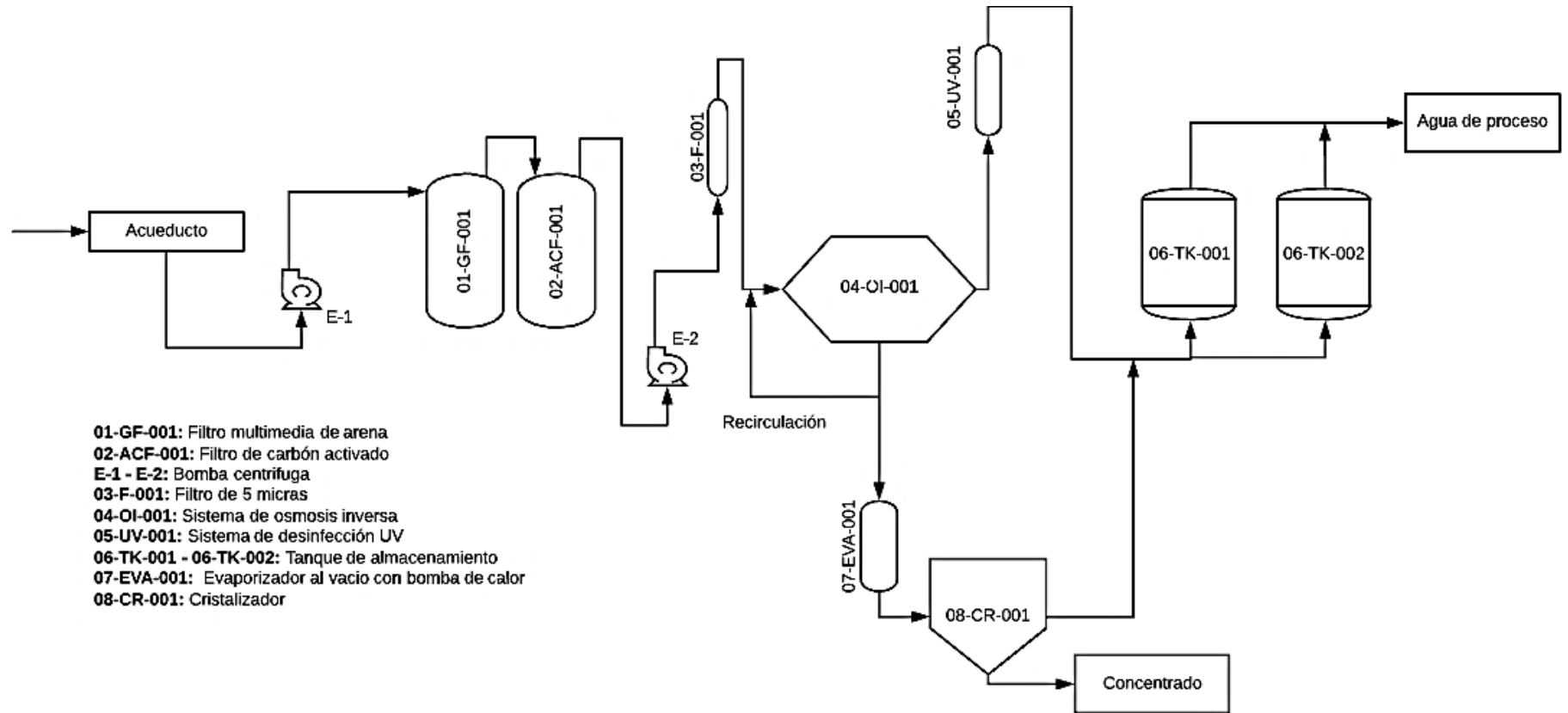
Son altamente eficaces incluso cuando las tecnologías convencionales no son viables. Mediante un evaporador al vacío se puede transformar un efluente residual en dos corrientes, una de concentrado (incluso llegando a la sequedad) y otra de agua de elevada calidad. Para reducir el consumo energético, los evaporadores trabajan en condiciones de vacío, así se consigue que la temperatura de ebullición del efluente líquido sea inferior. (Condorchem Envitech, s, f)

La cristalización es un método de separación en el que se produce la formación de un sólido (cristal o precipitado) a partir de una fase homogénea, líquida o gaseosa. El sólido formado puede llegar a ser muy puro, por lo que la cristalización también se emplea a nivel industrial como proceso de purificación. Para que la cristalización se pueda llevar a cabo es condición indispensable que la solución se encuentre sobresaturada. (Condorchem Envitech, s, f)

El proceso de cristalización no es sencillo y la etapa más importante consiste en la formación de cristales sólidos en el seno de la solución líquida. La solución se concentra y se enfría hasta que la concentración del soluto es superior a la solubilidad a dicha temperatura y el soluto forma cristales casi puros. (Condorchem Envitech, s, f)

Para empezar el análisis de la alternativa se realizó un diagrama de flujo de proceso en el cual, es posible identificar las unidades requeridas y así mismo tener una representación esquemática de la alternativa al momento de operación; este incluye las unidades y dirección de flujo.

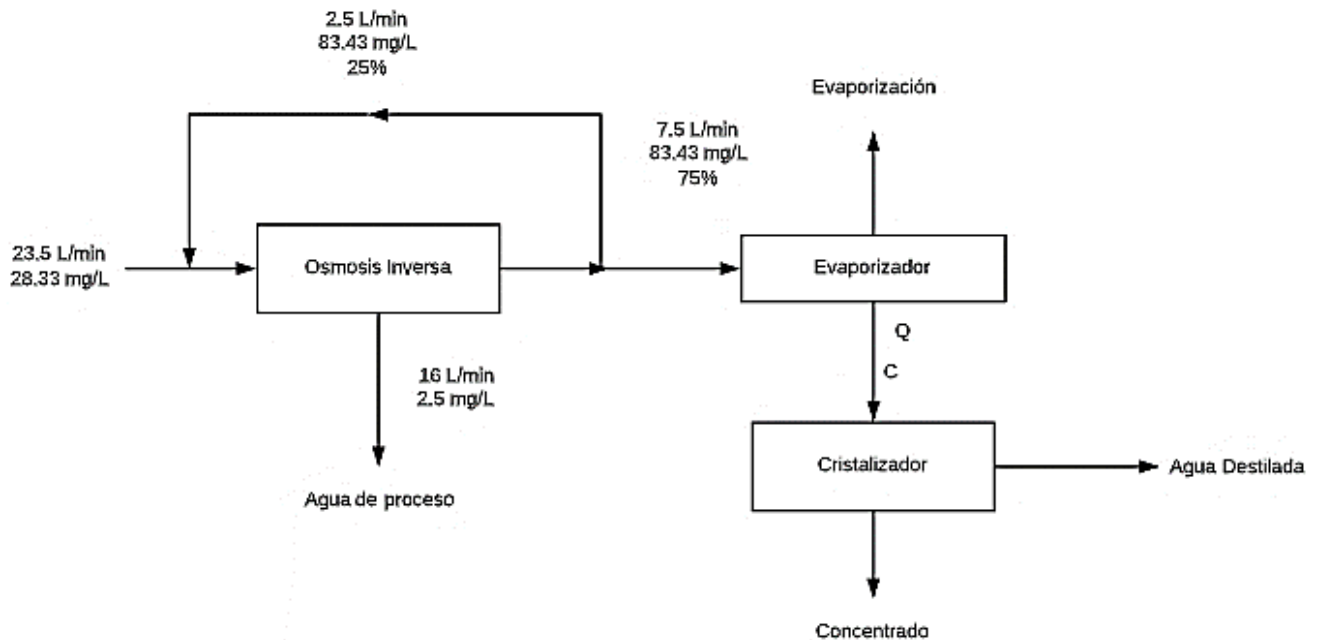
Ilustración 14. Diagrama de flujo de procesos alternativa 3.



Fuente: Autores.

A continuación, se realizó un balance de materia con el cual fue posible establecer un acercamiento al comportamiento del proceso al momento de desarrollar la alternativa; dentro de esta propuesta se realiza una recirculación (aproximadamente el 25% del agua de rechazo) justo después de salir del sistema para nuevamente ingresar junto con el caudal de entrada de la ósmosis inversa, igualmente se agregan dos unidades que tienen como finalidad tratar el caudal del agua de rechazo (evaporización y cristalización).

**Ilustración 15. Balance de materia alternativa 3.**



**Fuente:** Autores.

En primer lugar, se procede a calcular el caudal de salida del evaporador (Q), teniendo en cuenta que la concentración de salida es el valor de la solubilidad del Cloruro de Sodio en mg/L. En la siguiente ecuación  $Q_E$  es el valor del caudal de entrada al evaporador y  $C_E$  es la concentración de entrada.

$$\text{Solubilidad NaCl} = \frac{36g}{100cm^3} * \frac{1000cm^3}{1L} = \frac{360g}{L} * \frac{1000mg}{1g} = 360000mg/L$$



$$Q_E * C_E = Q * C$$

$$83,43 \text{ mg/L} * 7,5 \text{ L/min} = Q * 360000 \text{ mg/L}$$

$$Q = \frac{83,43 \text{ mg/L} * 7,5 \text{ L/min}}{360000 \text{ mg/L}} = 1,73 * 10^{-3} \text{ L/min}$$

Después de obtener el caudal de salida de la unidad se calcula el valor de la evaporación del agua que se genera dentro de la unidad.

$$\textit{Entrada} = \textit{Evaporización} + \textit{Salida}$$

$$7,5 \text{ L/min} = \textit{Evaporización} + 1,73 * 10^{-3} \text{ L/min}$$

$$\textit{Evaporización} = 1,73 * 10^{-3} \text{ L/min} - 7,5 \text{ L/min}$$

$$\textit{Evaporización} = 7,49 \text{ L/min}$$

A continuación, se calculó el consumo energético en el que se incurriría al momento de implementar esta alternativa dentro de la empresa, asumiendo que la eficiencia de transferencia es del 100%. Para este cálculo se tuvo en cuenta que un Kg es equivalente a un L y que la energía necesaria para evaporar un litro de agua corresponde a 2257 KJ/Kg, según lo establecen Moran y Shapiro (1998).

$$\frac{2257 \text{ KJ}}{\text{Kg}} * \frac{7.49 \text{ Kg}}{\text{min}} * \frac{60 \text{ min}}{1 \text{ h}} = 1014295 \frac{\text{KJ}}{\text{h}}$$

$$1014295 \frac{KJ}{h} * 8h = 8114360 KJ$$

$$8125152 KJ * \frac{1 kW}{3600 KJ} = 2253.98 kW$$

Según la tarifa establecida por Enel Codensa para este municipio el valor de un kWh es de 509.5312 COP, por lo que el costo aproximado para el consumo requerido por la implementación de un evaporador y cristalizador (2253.9 Kw) sería de 1'150.000 COP.

Para la implementación de esta alternativa los equipos a utilizar están especificados en la siguiente tabla:

**Tabla 24. Listado de equipos requeridos para la alternativa 3.**

| <b>Insumo</b>     | <b>Cantidad</b> | <b>Marca</b> | <b>Valor (c/u)</b> |
|-------------------|-----------------|--------------|--------------------|
| Medidor de flujo  | 2               | Amspa        | \$ 393.000         |
| Tubería PVC ½     | 1               | Pavco        | \$20.000           |
| Válvulas Mariposa | 3               | Bray         | \$ 158.000         |
| Soldadura PVC     | 3               | Pavco        | \$49.900           |
| Removedor         | 1               | Pvc          | \$84.900           |
| Soportería        | 30 Kg           |              | \$9000             |
| Evaporador        | 1               |              | \$70.450.000       |
| Cristalizador     | 1               |              | \$85.000.000       |

**Fuente:** Autores.

Teniendo en cuenta lo descrito en la alternativa 2 donde se establece que la empresa de servicios paga un aproximado de 1.300 COP/m<sup>3</sup> de agua potable proveniente del

acueducto, es necesario tener en cuenta que con la implementación de esta alternativa al igual que con la anterior, existe una disminución en el costo de este servicio gracias a la recirculación de aproximadamente 2,5 L/min de agua con un costo aproximado de 46.800 COP.

Dentro del proceso de evaporización y cristalización del agua de rechazo se produce agua destilada con un caudal aproximado de 7.5 L/min (7.49 L/min provienen del evaporador en forma de vapor de agua que pueden ser condensados e incluidos en el proceso productivo y 0.1 L/min provenientes del cristizador que de igual manera pueden entrar al proceso productivo) que representa un ahorro en costos por utilización de agua potable proveniente del acueducto de aproximadamente 140.400 COP de manera bimensual ( anualmente 842.400 COP).

En cuanto al concentrado resultante del proceso se calculó su peso con ayuda de la fórmula de ppm a partir de la concentración con la que este ingresa al cristizador (360000 mg/L) y con el caudal de entrada a la unidad que es de  $1.73 \cdot 10^{-3}$  L/min.

$$1.73 \frac{L}{min} * \frac{60 min}{1 h} * 8 h = 0.8304 L$$

$$ppm = \frac{mg \text{ de soluto}}{Litros \text{ de solución}}$$

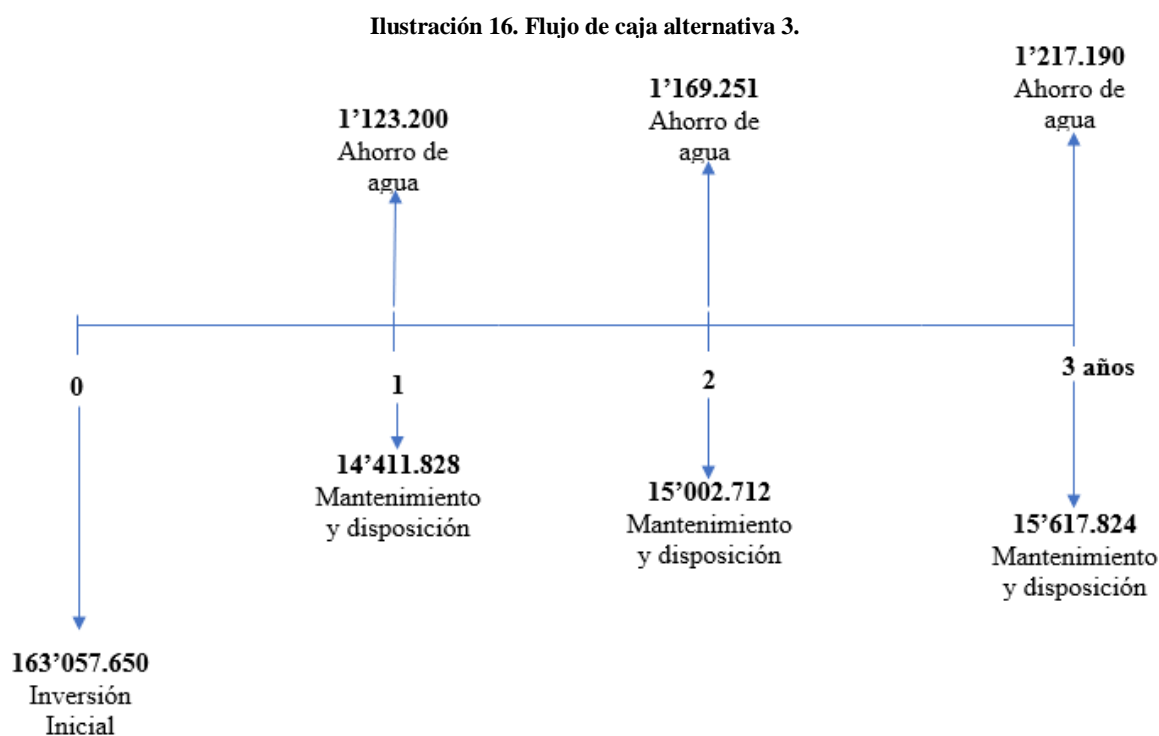
$$360000 ppm = \frac{mg \text{ de soluto}}{0.8304 L \text{ de solución}}$$

$$360000 \frac{mg}{L} * 0.8304 L = mg \text{ de soluto}$$

$$298944 mg = mg \text{ de soluto}$$

El costo por disposición que actualmente paga la empresa es de 633 COP por cada kilogramo a disponer, por esta razón el costo de disposición del concentrado resultante (4.4835 Kg mensual) es de 2835 COP cada mes.

Para el cálculo del valor presente neto se utiliza la fórmula establecida por Baca (2000), tal como fue establecida en la alternativa anterior. Igualmente, se adaptó la convención donde la línea horizontal representa el tiempo (para este proyecto fue de tres años); de esta línea de tiempo salen flechas hacia arriba y otras hacia abajo, las que están hacia arriba representan los ingresos y las que están hacia abajo representan los egresos; la línea de tiempo para esta alternativa es la siguiente:



**Fuente:** Autores.

El valor presente neto para esta alternativa se calcula con la siguiente ecuación, donde F es el capital inicial más los intereses, es decir, el valor futuro; i es la tasa de interés

utilizada para este proyecto se tuvo en cuenta el interés bancario de referencia (IBR), que es una tasa de interés de referencia de corto plazo denominada en pesos colombianos, que refleja el precio al que los bancos están dispuestos a ofrecer o a captar recursos en el mercado monetario. (Banco de la República, s. f)

$$\begin{aligned}
 VPN = & [-162'553050 - 14'445884(1 + 0.041)^{-1} - 15'038165(1 + 0.041)^{-2} \\
 & - 15'654730(1 + 0.041)^{-3}] \\
 & + [1'123200(1 + 0.041)^{-1} + 1'169251(1 + 0.041)^{-2} \\
 & + 1'217190(1 + 0.041)^{-3}]
 \end{aligned}$$

$$VPN = -201'353.409$$

Dentro del **ANEXO 4** se encuentra con mayor detalle el presupuesto preliminar para esta alternativa, donde se especifican los insumos y mano de obra requeridos con mayor detalle, que sirven como apoyo para el análisis de costo preliminar, mostrado a continuación.

**Tabla 25. Análisis de costos preliminar.**

| <b>Análisis preliminar de costos Alternativa 2</b> |             |                           |
|--|-------------|---------------------------|
| <b>CAPEX</b>                                       | Compras     | \$156.839.800 COP         |
|  | Instalación | \$6.217.850 COP           |
|  | $\Sigma$    | <b>\$163.057.650 COP</b>  |
| <b>OPEX</b>  | Operación   | \$ 14.411.828 COP         |
|  | Químicos    | \$0 COP                   |
|  | Disposición | \$34.056 COP              |
|  | $\Sigma$    | <b>\$14.445.884 COP</b>   |
| <b>VPN</b>   |             | <b>\$-201.353.409 COP</b> |
| <b>Payback</b>                                     |             | <b>445 meses</b>          |

**Fuente:** Autores.

El área para ocupar por las unidades de evaporización y cristalización es considerable con respecto a la distribución y tamaño actual de la empresa, siendo una desventaja para la aplicación de esta alternativa; además de esto, la empresa no cuenta con los equipos requeridos por lo que es necesario suministrar dinero para la adquisición de dichas unidades

A continuación, se realizó una evaluación de los riesgos asociados a la implementación de esta alternativa mencionados en la tabla 26 mediante el uso de una matriz probabilidad impacto (ilustración 17) tomada del PMBOK.

**Ilustración 17. Matriz P&I alternativa 3.**

|         |     | Amenazas     |      |      |      |      | Oportunidades |      |      |      |      |
|---------|-----|--------------|------|------|------|------|---------------|------|------|------|------|
| Impacto | 0,9 | 0,09         | 0,27 | 0,45 | 0,63 | 0,81 | 0,81          | 0,63 | 0,45 | 0,27 | 0,09 |
|         | 0,7 | 0,07         | 0,21 | 0,35 | 0,49 | 0,63 | 0,63          | 0,49 | 0,35 | 0,21 | 0,07 |
|         | 0,5 | 0,05         | 0,15 | 0,25 | 0,35 | 0,45 | 0,45          | 0,35 | 0,25 | 0,15 | 0,05 |
|         | 0,3 | 0,03         | 0,09 | 0,15 | 0,21 | 0,27 | 0,27          | 0,21 | 0,15 | 0,09 | 0,03 |
|         | 0,1 | 0,01         | 0,03 | 0,05 | 0,07 | 0,09 | 0,09          | 0,07 | 0,05 | 0,03 | 0,01 |
|         |     | 0,1          | 0,3  | 0,5  | 0,7  | 0,9  | 0,9           | 0,7  | 0,5  | 0,3  | 0,1  |
|         |     | Probabilidad |      |      |      |      |               |      |      |      |      |

■ = Prioridad Alta  
 ■ = Prioridad Media  
 ■ = Prioridad Baja

**Fuente:** Guía de los Fundamentos de la Dirección de Proyectos. (2013)

A continuación, se presentan los riesgos con su respectiva valoración según su impacto y probabilidad de ocurrencia.

Tabla 26. Evaluación de riesgos alternativa 3.

| Riesgo               | *P  | *I  | Valoración  | Riesgo             |               |                |               |                   |
|----------------------|-----|-----|-------------|--------------------|---------------|----------------|---------------|-------------------|
|                      |     |     |             | Muy bajo<br>(0.05) | Bajo<br>(0.1) | Medio<br>(0.2) | Alto<br>(0.4) | Muy Alto<br>(0.8) |
| Disminución          |     |     |             |                    |               |                |               |                   |
| calidad del agua     | 0,1 | 0,1 | <b>0,01</b> | X                  |               |                |               |                   |
| Impactos ambientales | 0,7 | 0,5 | <b>0,35</b> |                    |               | X              |               |                   |
| Pérdidas económicas  | 0,9 | 0,7 | <b>0,63</b> |                    |               |                | X             |                   |

Fuente: Autores.

Con respecto a los riesgos, estos se establecen de acuerdo con el funcionamiento del sistema que se plantea en la alternativa, ya que el solo hecho de mejorar el proceso e implementar tanto el evaporador como el cristizador representa un impacto en la rentabilidad de los procesos, es decir, que estos deben satisfacer los requerimientos del cliente en cuanto a la pureza del producto y a la distribución de tamaño de cristal; si la pureza de los cristales no son aceptables, la cristalización tendrá que pasar por nuevas etapas de procesamiento, ocasionando un incremento en el costo del producto. (Ávila 2010)

### Evaluación de alternativas

A partir de la información consignada con anterioridad, donde se describe y especifican cada una de las alternativas propuestas, fue posible realizar la evaluación de estas mediante una matriz que contiene varios factores con los cuales cada una fue evaluada.

Los valores para la evaluación por criterio van de 1 a 5 (donde 1 es poco viable/poco importante para la empresa y 5 es muy viable/muy importante para la empresa), a continuación, se especifica esta puntuación por factor

- **Área:** Al obtener un valor de 1 se indica que la empresa no cuenta con el espacio necesario para desarrollar la alternativa; un valor de 3 indica que es posible implementar la alternativa, sin embargo, el espacio disponible se verá considerablemente reducido; un valor de 5 indica que la empresa cuenta con el espacio necesario para poder integrar en su proceso la alternativa.
- **CAPEX:** Al obtener un valor de 1 se indica que la inversión en cuanto a costos por compras e instalación es muy elevada, por tanto, es poco viable; un valor de 3 indica que es posible implementar la alternativa, ya que, el presupuesto se encuentra a alcance de la empresa; un valor de 5 indica que el presupuesto es muy viable económicamente.
- **OPEX:** Al obtener un valor de 1 se indica que los costos por operación y mantenimiento son muy elevados dificultando su sostenimiento; un valor de 3 indica que es posible implementar la alternativa, sin embargo, estos costos son considerables; un valor de 5 indica que es viable implementar esta alternativa gracias a que sus costos por operación y mantenimiento son bajos.
- **Payback:** Al obtener un valor de 1 se indica que la alternativa no presenta una tasa de retorno; un valor de 3 indica que la tasa de retorno se encuentra dentro de los tres años evaluados; un valor de 5 indica que la tasa de retorno es menor a dos años.



- **Tiempo de desarrollo:** Al obtener un valor de 1 se indica que la alternativa no cumple con el tiempo establecido; un valor de 5 indica que el tiempo de desarrollo se cumple.
- **Factibilidad técnica:** Al obtener un valor de 1 se indica que la empresa no cuenta con las especificaciones técnicas requeridas para la implementación de la empresa; un valor de 5 indica que la empresa cuenta con las especificaciones técnicas requeridas para poder integrar en su proceso la alternativa.
- **Factibilidad operacional:** Al obtener un valor de 1 se indica que la empresa no cuenta con personal capacitado para la implementación de la empresa; un valor de 5 indica que la empresa cuenta con los recursos humanos necesarios para llevar a cabo la alternativa, así como, para garantizar su sostenimiento.
- **Riesgos potenciales:** Al obtener un valor de 1 se indica que al implementar la alternativa se puede producir alguno de los riesgos asociados, gracias a alguna actividad inherente a su aplicación u operación; un valor de 5 indica que la probabilidad de ocurrencia y control es mínima, de igual forma, en caso de ocurrencia presenta facilidad en cuanto a su control o mitigación.
- **Consumo energético:** Al obtener un valor de 1 se indica que la alternativa incurre en un aumento del consumo de este recurso debido a la utilización de los equipos requeridos; un valor de 3 indica que existe un aumento en el consumo de energía, pero no es relevante; un valor de 5 indica que la alternativa no presenta cambios en el consumo regular de este recurso.
- **Concordancia con los objetivos empresariales:** Al obtener un valor de 1 se indica que la alternativa dista de los objetivos empresariales; un valor de 3 indica que concuerda con algunos de los objetivos; un valor de 5 indica que la alternativa se adapta al 100% con los objetivos empresariales.

Estos criterios fueron sumados para cada alternativa y se logró la selección de la opción más deseable u óptima. Es necesario tener en cuenta que el valor máximo a obtener es de 60.

**Tabla 27. Evaluación de alternativas.**

| <b><i>FACTORES</i></b>                       | <b><i>1</i></b> | <b><i>2</i></b> | <b><i>3</i></b> |
|--|-----------------|-----------------|-----------------|
| Área   | 3               | 5               | 1               |
| CAPEX  | 3               | 4               | 1               |
| OPEX   | 1               | 5               | 1               |
| Payback                                      | 1               | 3               | 1               |
| Tiempo de desarrollo                         | 5               | 5               | 5               |
| Factibilidad técnica                         | 3               | 5               | 1               |
| Factibilidad operacional                     | 5               | 4               | 1               |
| Riesgos potenciales                          |                 |                 |                 |
| – Disminución de calidad                     | 4               | 5               | 5               |
| – Impactos en ambiente                       | 4               | 4               | 3               |
| – Pérdidas económicas                        | 1               | 2               | 1               |
| Consumo energético                           | 5               | 5               | 1               |
| Concordancia con los objetivos empresariales | 5               | 5               | 5               |
| <b>TOTAL</b>                                 | <b>40</b>       | <b>52</b>       | <b>26</b>       |

**Fuente:** Autores.

Según lo evaluado en la tabla anterior pudimos observar que la alternativa 2 obtuvo un puntaje de 52, razón por la que queda como la opción más viable no solo económica si no técnica y operacionalmente, para su aplicación dentro de la empresa de refrigerantes.

### **FASE III: Ingeniería Básica**

La reutilización de las aguas es una forma de volver a utilizar el recurso hídrico varias veces en procesos cotidianos que no requieran de aguas muy potabilizadas, estos procesos se dan antes de ser devueltos al dominio público y elementos de desagüe, permitiendo así disminuir el vertimiento de agua a la red pública. (Díaz & Ramírez, 2016)

La recirculación y descarga de aparatos sanitarios se evaluó como la alternativa con más viabilidad; en la fase anterior se presentan la comparación de la caracterización fisicoquímica con los valores máximos permitidos por la resolución 1207 de 2014, con la cual fue posible afirmar que el agua de rechazo proveniente del sistema de ósmosis inversa se puede utilizar en la descarga de los aparatos.

De igual manera se identificó que la cantidad de sales que contenía el agua de rechazo eran bajos ( $74.16 \mu\text{S}/\text{cm}$ ), esto teniendo en cuenta que el agua que entra al sistema es agua potable, además se observó en los diagramas y balances de masa el comportamiento que tendría el sistema si se implementara esta alternativa.

A pesar de que esta alternativa presento un valor presente neto (VPN) negativo, fue la más viable para su aplicación debido a factores como factibilidad técnica y operacional, área, riesgos, consumo energético y compatibilidad con los objetivos empresariales.

Para la elaboración de esta fase se tomó la alternativa seleccionada en la fase II y se desarrolló la ingeniería base en la cual esta se detalla y se ajusta a las condiciones actuales de la empresa. Para lograr el ajuste se realiza un diagrama de tubería e instrumentación (P&ID), un *Layout* que muestra la ubicación dentro de la empresa junto con el área a ocupar y por último se realiza un análisis costo- beneficio. Lo mencionado anteriormente se desarrolla a continuación:

## P&ID

Un P&ID es lo que se define como un diagrama de tuberías e instrumentación (DTI) también conocido del idioma inglés como *piping and instrumentation diagram/drawing* (P&ID) y es un diagrama que muestra el flujo del proceso en las tuberías, así como los equipos instalados y el instrumental. (Pirobloc,2017)

En la etapa de diseño, el diagrama ofrece la base para el desarrollo de esquemas de control del sistema, detalles clave de las tuberías e instrumentación, esquemas de control y apagado, requisitos de seguridad, normativa y la información básica de arranque y operación.

A partir del diagrama se identifican las direcciones del flujo del proceso en las tuberías, ubicación de equipos instalados y los instrumentos para indicar como están interconectados los diferentes elementos del proceso y las funciones de cada instrumento requerido para el desarrollo de la alternativa 2 (recirculación y descarga de aparatos sanitarios).

Para evidenciar lo mencionado anteriormente se utilizó el diagrama que muestra las tuberías de ½ pulgada para la circulación del agua con caudal de 26 l/min, un sistema de ósmosis inversa que contiene los siguientes equipos (filtro multimedia, filtro de carbón, un prefiltro, un posfiltro y las membranas), y un conjunto de accesorios de válvulas, bomba de recirculación e instrumentos de control como el medidor de flujo, temperatura y presión.

El diagrama de proceso para el aprovechamiento del agua de rechazo fue elaborado con ayuda del software Microsoft Visio como herramienta empleada por las empresas para organizar sistemas y procesos internos.

El P&ID como representación gráfica de procesos, tienen algunas limitaciones propias. No se los puede considerar modelos reales, porque no necesariamente se dibujan a escala

o con precisión geométrica. Por esa razón, es importante diseñar el *layout* y revisar la documentación que se concentra en las especificaciones técnicas. (lucidchart. s, f)

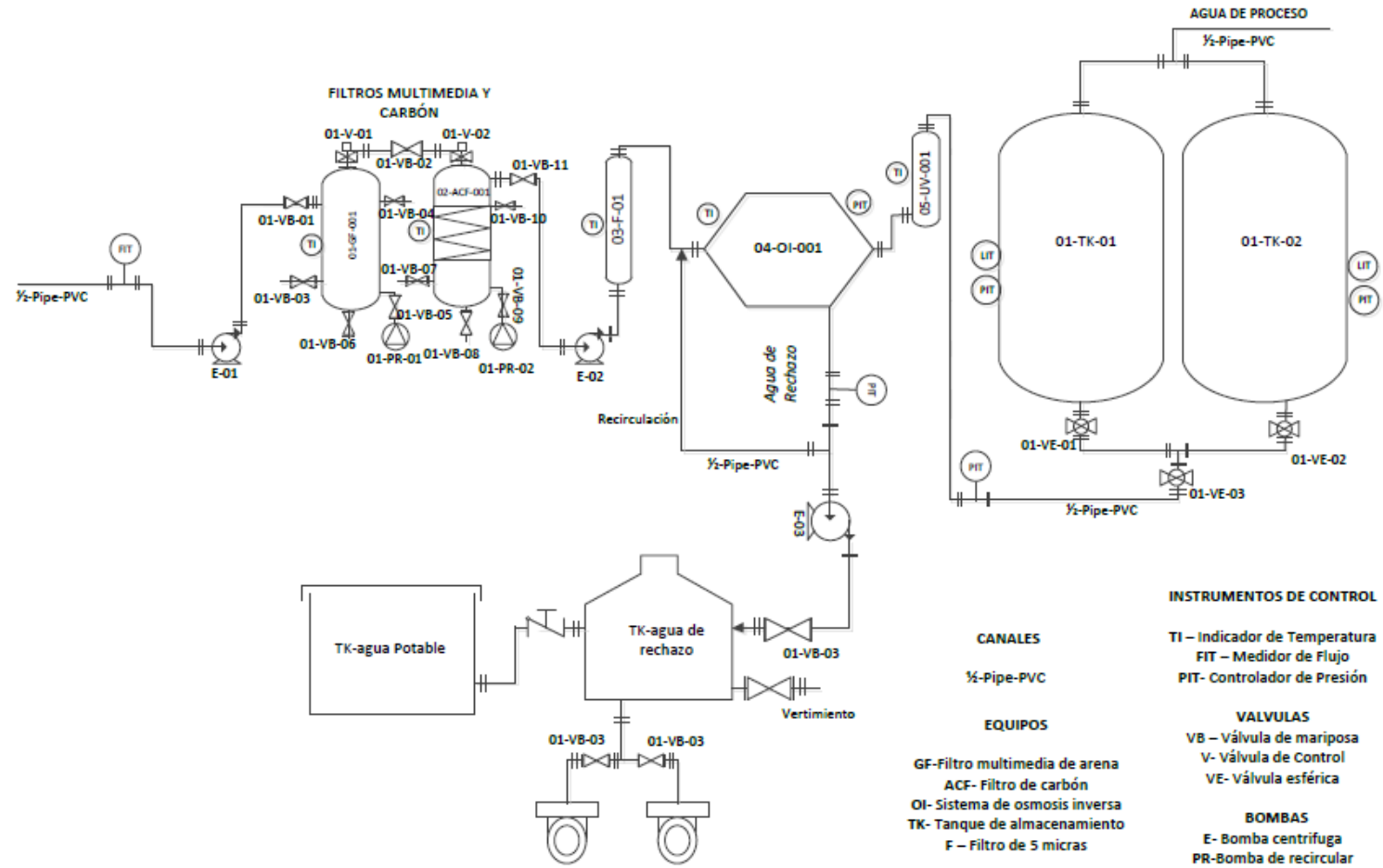
## **Layout**

Como complemento al P&ID, se elaboró el Layout que tiene como finalidad mostrar a nivel general la distribución de la empresa y la ubicación detallada de la alternativa seleccionada.

Al realizar la localización del área donde se destina para la recirculación y descarga de aparatos sanitarios, se procede a determinar equipos, dimensión y recorrido de tuberías, dentro del plano el cual representa cada una de las unidades del proceso, estanterías laboratorio, baños y oficinas y demás partes que se encuentra en la empresa.

Para la descarga de aparatos sanitarios se instala un tanque de 1 m<sup>3</sup> en la planta del piso 2 donde se almacena el agua de rechazo proveniente del equipo de osmosis inversa el cual cuenta con su tubería y accesorios necesarios para su funcionamiento. (ANEXO 5)

**Ilustración 18. Diagrama de tubería e instrumentación alternativa 2.**



**Fuente:** Autores.

### **Análisis de costo-beneficio**

Para esta actividad se tomó la relación beneficio/costo, que consiste en poner el valor presente todos los costos del proyecto, con el fin de evaluar la alternativa 2 en cuanto a su inversión. A continuación, se realizó el cálculo de la relación B/C mediante el uso de la siguiente ecuación:

$$\text{Relacion } B/C = \frac{\text{Valor presente de los ingresos}}{\text{Valor presente de los costos}}$$

$$\text{Relacion } B/C = \frac{365.040}{60.000} = 6.084$$

El valor presente neto para esta alternativa se calculó de la siguiente forma

$$\begin{aligned} \text{VPN} = & [-10'272550 - 60000(1 + 0.041)^{-1} - 62460(1 + 0.041)^{-2} \\ & - 65020(1 + 0.041)^{-3}] \\ & + [365040(1 + 0.041)^{-1} + 380006(1 + 0.041)^{-2} \\ & + 395586(1 + 0.041)^{-3}] \end{aligned}$$

$$\text{VPN} = -9'393472$$

Para calcular el VP se tomó el valor presente neto (VPN) que representa el valor presente (VP) menos la cantidad de la inversión inicial, teniendo en cuenta que el VP es calculado utilizando el costo del capital a futuro a partir de una tasa de interés. (Castro, 2018)

$$\text{VPN} = \text{VP} - \text{Inversión}$$

$$\text{VP} = -9'393472 + 10'272550 = 879078$$

Se realizó la siguiente matriz. Con el fin de mostrar los datos necesarios para el análisis.

**Tabla 28. Matriz B/C**

| <b>Alternativa</b> | <b>A</b>     |
|--------------------|--------------|
| Inversión Inicial  | \$10'272.550 |
| Beneficios         | \$365.040    |
| VP                 | \$879.078    |
| VPN                | \$-9'393.471 |

**Fuente:** Autores

Al tener un valor de  $B/C > 1$  se puede decir que la alternativa es económicamente viable para el inversionista (en este caso la empresa de refrigerantes automotrices) ya que sus ingresos son mayores a los egresos, sin embargo, el tener un  $VPN < 0$  implica que la inversión inicial no se recupera dentro de los tres años evaluados a una tasa de interés del 4.1%, no obstante, es posible que en un lapso de tiempo más largo sea posible el retorno de la inversión; de igual manera sigue representando la alternativa más viable para su implementación.



## CONCLUSIONES

La empresa de refrigerantes automotrices actualmente cuenta con un área aproximada de 865 m<sup>2</sup>, en la cual se utilizan aproximadamente 26 L/min de agua potable provenientes del acueducto municipal para abastecer el sistema de ósmosis inversa, esta entra con una conductividad promedio de 56.66  $\mu$ S/cm y una concentración de sólidos disueltos totales de 28.33 mg/L. Del volumen mencionado, existe un porcentaje de agua de rechazo de más o menos el 38.46%, lo que representa un caudal de 10 L/min con una conductividad de 148.33  $\mu$ S/cm y una concentración de sólidos disueltos totales de 74.16 mg/L.

Durante el desarrollo de la fase II, se establecieron tres alternativas, alternativa 1 (agua de riego), alternativa 2 (recirculación y descarga de aparatos sanitarios) y alternativa 3 (evaporización y cristalización), para las cuales se elaboró una descripción que incluía balances de materia, diagrama de flujo de procesos y análisis preliminares de costos, con los cuales fue posible realizar la evaluación para su futura selección, sin dejar de lado las características fisicoquímicas del agua de rechazo.

La alternativa 2 (recirculación y descarga de aparatos sanitarios), fue escogida mediante el uso de la matriz de evaluación de alternativas, con la cual fue posible observar que cumple con factores como el área que requiere para su implementación; el tiempo de desarrollo así como su Payback o tiempo de retorno es corto; no exige un aumento en el consumo energético regular de la empresa; los riesgos potenciales para el ambiente, calidad del producto y economía pueden ser evitados y manejados con facilidad; esta alternativa es compatible con los objetivos y valores empresariales donde se destaca la responsabilidad no solo con clientes y trabajadores sino en diferentes instancias.

Es importante señalar que a pesar de que los costos tanto de inversión como de operación son asequibles; esta alternativa presenta un VPN de -9'393.472, lo que implica que a una tasa de interés del 4.1% (IBR) a tres años no sea posible recuperar la inversión inicial, esto

debido a que los ingresos obtenidos para el tiempo valorado no son suficientes para recuperar la inversión.

Para la elaboración de la fase III, se realizó un inicio de ingeniería básica en el que se estableció diagrama de tuberías e instrumentación (P&ID) por medio de la utilización del programa Visio, en el cual es posible observar no solo las conexiones, tuberías y accesorios actuales de la empresa, sino que también ofrece una ayuda para visualizar la posible implementación de la alternativa seleccionada. Igualmente se realizó un *Layout* con el cual es posible ubicar espacialmente la alternativa.

Finalmente, se estableció el análisis costo beneficio con el cual se obtuvo un valor de  $B/C > 1$  que da indicios de que es una alternativa, sin embargo, el tener un  $VPN < 0$  implica que la inversión inicial no se recupera dentro de los tres años evaluados a una tasa de interés del 4.1%, no obstante, es posible que en un lapso de tiempo más largo sea posible el retorno de la inversión; a pesar de esto sigue representando la alternativa más viable para su implementación de las tres opciones planteadas.

## RECOMENDACIONES

Se recomienda a la empresa analizar la implementación de resinas de intercambio iónico con el fin de desmineralizar el agua de rechazo que se obtiene del sistema de ósmosis inversa, logrando beneficiarlos económica y ambientalmente.

Se aconseja implementar tanques para el almacenamiento del agua de rechazo esto con el objetivo de disminuir la cantidad de agua que se está vertiendo. De igual manera, se sugiere a la empresa ejercer mayor control en cuanto a la toma de datos de conductividad y caudal con el propósito de tener una base de datos más exacta sobre el funcionamiento no solo del sistema de ósmosis si no de la empresa.

Se recomienda la asociación con comerciantes, campesinos, agricultores, núcleos familiares aledaños a las instalaciones, que puedan hacer uso del agua de rechazo proveniente del sistema de ósmosis inversa, esto con el propósito de disminuir el caudal vertido en la empresa y lograr una reutilización del agua en las empresas aledañas para conseguir una economía circular.

Por último, se aconseja tener mayor profundidad en el estudio de las implicaciones no contempladas que puede traer realizar la recirculación a las membranas de la ósmosis inversa.

## REFERENCIAS

### Libros

- Baca G. (2000). Ingeniería económica. Bogotá D.C. Colombia. Politécnico Gran Colombiano.
- Carreño, C. A. (2016). Biotecnología ambiental de aguas y aguas residuales. Bogotá: Universidad Nacional Mayor de San Marcos.
- ENOHSA. (2003). “Guía para la presentación de proyectos de agua potable: Fundamentación” Capítulo VIII, sección 7, Págs. 4, 5, 6, (Utilización de membranas y alternativas para la desalinización).
- FAO. (2012). El estado de los recursos de tierras y aguas del mundo para la alimentación y la agricultura. La gestión de los sistemas en situación de riesgo. Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura, Roma, y Mundi-Prensa, Madrid.
- FAO (2013). Reutilización del agua en la agricultura: ¿Beneficios para todos? Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura Roma.
- Fernández et al. (2006). Tratamientos avanzados de aguas residuales industriales. Madrid, España. Editorial. Dirección General de Universidades e Investigación.
- Lucidchart (s, f). Qué son los diagramas de tuberías e instrumentación. Obtenido de: <https://www.lucidchart.com/pages/es/que-son-los-diagramas-de-tuberias-e-instrumentacion#section>
- Morán y Chápiro (1998). Fundamentos de Termodinámica técnica. Barcelona. España. Editorial Reverte.
- Guía de los Fundamentos de la Dirección de Proyectos (2013) Quinta Edición, Pensilvania. Estados Unidos.

- Himmelblau, D. (2015). Principios Básicos y Cálculos en Ingeniería Química. Texas-Mexico.
- Metcalf & Eddy. (1998). Ingeniería de aguas Residuales tratamiento, vertido y reutilización. 3a ed. Madrid, España. McGraw-Hill
- Orozco, C. R. (2013). El Desarrollo Sustentable: Nuevo Paradigma Para la Administración Pública. México: Instituto Nacional de Administración Pública, A.c.
- Rodriguez et al. (2005). Desafíos del derecho humano al agua en el Perú. Lima-Peru: Centro de investigación social y educación popular.
- Romero, J. (2006). Purificación de Agua. Bogotá D.C. Colombia. Editorial Escuela Colombiana De Ingeniería.
- Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater (2017) 23d Edition.
- Universal Osmosis. (2019). Manual Ultralite 4.4K.

## Revistas

- Apartado Mancilla L.A. (2009). Determinación del número de etapas y arreglo óptimo de módulos en un sistema de ultrafiltración. (Trabajo de grado). Universidad Nacional de México.
- Ávila S. (2010). Control del proceso de cristalización continuo no-isotérmico empleando lógica difusa. Instituto Tecnológico de Celaya.Celaya.Mexico
- Cabezas E. (2013). Externalidades ambientales en la aplicación de ósmosis inversa para potabilización de agua solo para la ingesta. (Tesis de maestría).
- Díaz Oviedo J., Ramírez Miele L. (2016). Diseño de un sistema de tratamiento y reutilización del agua de la lavadora aplicado a los hogares de Bogotá D.C. (Monografía).

- Dueñas, Carolina & Amaya, Lina & Donado, Leonardo. (2015). Reúso del Agua Residual Tratada: Una Propuesta de Regulación para el uso seguro. Recuperado de: [https://www.researchgate.net/publication/287645863\\_Reuso\\_del\\_Agua\\_Residual\\_Tratada\\_Una\\_Propuesta\\_de\\_Regulacion\\_para\\_el\\_uso\\_seguro/citation/download](https://www.researchgate.net/publication/287645863_Reuso_del_Agua_Residual_Tratada_Una_Propuesta_de_Regulacion_para_el_uso_seguro/citation/download)
- Granados et al. (2018). Balance de masa. Obtenido de: <http://www.fi.unsj.edu.ar/asignaturas/introing/BalanceDeMasa.pdf>
- Gómez C.O. (2018) Desalinización de agua para aplicaciones de potabilización mediante el desarrollo de tecnología solar sustentable. (Trabajo de grado). Centro de investigaciones en óptica. Aguas Caliente. México. Recuperado de: <https://cio.repositorioinstitucional.mx/jspui/bitstream/1002/873/1/17450.pdf>
- Mellado, M. S. (2017). Sistema de tratamiento de aguas mediante ósmosis inversa. México: Universidad Nacional Autónoma de México.
- Vázquez Solís. (2017). Sistema de tratamiento de aguas mediante ósmosis inversa. Recuperado de: <http://www.ptolomeo.unam.mx:8080/xmlui/bitstream/handle/132.248.52.100/15143/Informe.pdf?sequence=3>
- Roza, M. A. (2015). Reúso del agua: el reto para las empresas. Revista La República.
- Velandia, S.L y Urbina S.O. (2008). Propuesta para la implementación de un sistema de gestión ambiental en la empresa qool-engine s.a. basado en la norma ISO 14001. (Tesis de grado). Universidad de América. Bogotá, Colombia.
- Clavijo, J. L. (2017). Propuesta de mejoramiento del líquido refrigerante automotriz fabricado por la empresa ecoquimicos. Bogota D.C.
- Sandra Liliana Rojas Velandia, S. O. (2008). Propuesta para la implementación de un sistema de gestión ambiental en la empresa qool-engine s.a. basado en la. Bogota D.C.

## Cibergrafía

- Amendola Luis, T. D. (2016). *Impacto de los CAPEX Y OPEX en la gestión de activos*. Obtenido de Linked in: <https://www.linkedin.com/pulse/impacto-de-los-capex-y-opex-en-la-gesti%C3%B3n-activos-amendola>
- Banco de la Republica. (s. f). Indicador Bancario de referencia. Obtenido de: <https://www.banrep.gov.co/es/estadisticas/indicador-bancario-referencia-ibr>
- Castro, E. (18 de agosto de 2018). SlideShare. Obtenido de <https://es.slideshare.net/jenofanes/estudio-defactibilidad>
- Córdova, M. A. (01 de junio de 2016). Slideshare. Obtenido de Gestión de Riesgos en Proyectos según el PMBOK: Lineamientos Generales para su implementación: <https://es.slideshare.net/ManuelAsmatCrdovalMBA/gestin-de-riesgos-en-proyectos-segn-el-pmbok-lineamientos-generales-para-su-implementacin>
- Condorchem Envitech. (s.f.) Evaporadores al vacío para el tratamiento de salmueras. Obtenido de: <https://blog.condorchem.com/evaporadores-al-vacio-para-el-tratamiento-de-salmueras/>
- Condorchem Envitech (s.f.) Introducción a los cristalizadores al vacío. Obtenido de: <https://condorchem.com/es/cristalizadores/>
- Euromaster Automocion y Servicios, S.A. (2019). *Liquido Refrigerante*. Obtenido de Liquido Refrigerante: <https://www.euromaster-neumaticos.es/mecanica-rapida/liquido-refrigerante>
- Hanna Instruments SAS. (s.f.). Medidor portátil de temperatura y pH/EC/TDS. Obtenido de: <https://www.hannacolombia.com/products/product/896/pdf>
- Omega. (s.f.). Conductividad y Resistividad. Obtenido de Conductividad y Resistividad: <https://www.omega.co.uk/techref/ph-2.html>
- Organización de Naciones Unidas (ONU). Agua. Estados Unidos. Nueva York. Recuperado de: <https://www.un.org/es/sections/issues-depth/water/index.html>

- Organización mundial de la salud (OMS). Escases de agua. Ginebra. Suiza.  
Recuperado de:  
[https://www.who.int/features/factfiles/water/water\\_facts/es/index1.html](https://www.who.int/features/factfiles/water/water_facts/es/index1.html)
- Organización de las naciones unidas para la educación, la ciencia y la cultura. (UNESCO). (2017). Día Mundial del agua 2017, Las aguas residuales el recurso desaprovechado. Paris. Francia. Recuperado de:  
<http://www.unesco.org/new/es/unesco/events/prizes-and-celebrations/celebrations/international-days/world-water-day-2017/>
- Ósmosis Inversa. (martes de 01 de 2007). Obtenido de Ósmosis Inversa:  
<https://www.textoscientificos.com/quimica/ósmosis/inversa>
- Pirobloc. (01 de marzo de 2017). Obtenido de pirobloc:  
<https://www.pirobloc.com/blog-es/que-es-un-piping-and-instrumentation-diagram/>
- Pública, S. d. (s.f.). Ley de la conservación de la masa. Obtenido de Ley de la conservación de la masa:  
[https://www.aev.cgfie.ipn.mx/Materia\\_quimica/temas/tema1/subtema4/subtema4.html](https://www.aev.cgfie.ipn.mx/Materia_quimica/temas/tema1/subtema4/subtema4.html)
- Resolución 1207 de 2014. Por la cual se adoptan disposiciones relacionadas con el uso de aguas residuales tratadas. Obtenido de: <http://parquearvi.org/wp-content/uploads/2016/11/Decreto-1207-de-2014.pdf>
- Resolución 0330 de 2017 ” Por la cual se adopta l reglamento técnico para el sector de agua potable y saneamiento básico -RAS y se derogan las resoluciones 1092 del 2000, 0424 de 2001, 0668 de 2003, 1459 de 2005, 2320 de 2009” Obtenido de:  
<http://www.minvivienda.gov.co/ResolucionesAgua/0330%20-%202017.pdf>
- Sistemas de tratamiento de aguas. (2010). Obtenido de:  
[http://www.nib.fmed.edu.uy/CursoIB\\_2010/diapositivas/Tratamiento\\_de\\_Agua2.pdf](http://www.nib.fmed.edu.uy/CursoIB_2010/diapositivas/Tratamiento_de_Agua2.pdf)



- Suarez, et.al. (2015). Evaporación. Tratamientos Avanzados. Inditex. Obtenido de: <https://www.wateractionplan.com/documents/177327/558161/Evaporizaci%C3%B3n.pdf/d8e51741-e013-5202-966d-251a21f26726>
- Springer, A. (05 de 08 de 2018). CAPEX vs OPEX: qué significan estos términos y en cuál debería enfocarse nuestra empresa. Obtenido de TICbeat: <https://www.ticbeat.com/empresa-b2b/capex-vs-opex-que-significan-estos-terminos-y-en-cual-deberia-enfocarse-nuestra-empresa/>
- Tuset, S. (s.f.). Condorchem Envitech. Obtenido de Condorchem Envitech: <https://blog.condorchem.com/fundamentos-evaporacion-al-vacio/#comments>
- Universidad Monte Ávila. (s.f.). Factibilidad Técnica y Operacional. Obtenido de Factibilidad Técnica y Operacional: [https://www.uma.edu.ve/moodle\\_uma/course/info.php?id=28](https://www.uma.edu.ve/moodle_uma/course/info.php?id=28)

## **ANEXOS**

**ANEXO 1.**

***Layout del tamaño y distribución de la empresa***

## ANEXO 2. Presupuesto alternativa 1.

| PRESUPUESTO ALTERNATIVA 1   |                                      |                       |           |      |              |               | Versión No. 01   |
|---|--------------------------------------|-----------------------|-----------|------|--------------|---------------|------------------|
| AREA- m2 =  |                                      |                       |           |      |              |               | 865 m2           |
| No.   |                                      | MARCA                 | UN        | CANT | VR. UNIT     | VR. PARCIAL   | VR. TOTAL        |
| I   | Administración e Ingeniería          |                       |           |      |              |               | \$ 5.217.850     |
| 1.1   | Director del Proyecto                |                       |           | 1    | \$ 2.371.750 | \$ 2.371.750  |                  |
| 1.1.1   | Ingeniero ambiental                  |                       |           | 2    | \$ 1.423.050 | \$ 2.846.100  |                  |
|   |                                      |                       |           |      |              |               |                  |
| II  | Compras y Accesorios                 |                       |           |      |              |               | \$ 13.765.000    |
| 2.1   | Valvulas                             |                       |           |      |              |               | \$ 343.800       |
| 2.1.1   | Valvulas de mariposa 1/2             | Grival                | Unid      | 3    | \$ 19.600    | \$ 58.800     |                  |
| 2.1.2   | Medidor de flujo                     | Digiten G             | Unid      | 1    | \$ 120.000   | \$ 120.000    |                  |
| 2.1.3   | Medidor de Presion                   | Telsa                 |           | 1    | \$ 165.000   | \$ 165.000    |                  |
| 2.2   | Tuberías y accesorios                |                       |           |      |              |               | \$ 40.000        |
| 2.2.1   | Tubería de PVC 1/2 + accesorios      | Pavco                 | m         | 2    | \$ 20.000    | \$ 40.000     |                  |
|   |                                      |                       |           |      |              |               |                  |
| 2.3   | Tanques                              |                       |           |      |              |               | \$ 13.021.400    |
| 2.3.1   | Tanque de almacenamiento de 1000 lts | Rotoplast             | lts       | 2    | \$ 6.510.700 | \$ 13.021.400 |                  |
|   |                                      |                       |           |      |              |               |                  |
| 2.4   | Otros                                |                       |           |      |              |               | \$ 359.800       |
| 2.4.1   | Soldadura PVC                        | Pavco                 | 1/4 Galon | 1    | \$ 49.900    | \$ 49.900     |                  |
| 2.4.2   | Removedor                            | Pcp                   | 1/4 Galon | 1    | \$ 84.900    | \$ 84.900     |                  |
| 2.4.3   | Soporteria                           |                       | Kg        | 25   | \$ 9.000     | \$ 225.000    |                  |
|   |                                      |                       |           |      |              |               |                  |
| III   | Instalación                          |                       |           |      |              |               | \$ 1.277.600     |
| 3.1   | Montaje de tuberías                  |                       |           | 1    | \$ 1.000.000 | \$ 1.000.000  |                  |
| 3.1.1   | Energia Electrica                    |                       |           | -    | -            | -             |                  |
| 3.1.2   | *Mano de obra                        |                       |           | 2    | \$ 3.470     | \$ 277.600    |                  |
|   |                                      |                       |           |      |              |               |                  |
|   | VALOR TOTAL CAPEX                    |                       |           |      |              |               | \$ 20.260.450,00 |
|   |                                      |                       |           |      |              |               |                  |
| IV  | Operación                            |                       |           |      |              |               | \$ 19.800.000    |
|   | Mantenimiento                        | Lavado y desinfección |           | 2    | 1m3          | \$ 60.000     | \$ 600.000       |
|   | *Transporte                          |                       |           | 2    | \$ 800.000   | \$ 1.600.000  | \$ 19.200.000    |
|   |                                      |                       |           |      |              |               |                  |
|   | VALOR TOTAL OPEX                     |                       |           |      |              |               | \$ 19.800.000    |
| * Transporte de agua de rechazo se realizara dos veces al mes         |                                      |                       |           |      |              |               |                  |
| *La mano de obra se calculo de acuerdo a las horas del mes trabajadas |                                      |                       |           |      |              |               |                  |

**Fuente: Autores.**

### ANEXOS 3. Presupuesto alternativa 2.

| PRESUPUESTO ALTERNATIVA 2       |                                   |                       |           |       |              |              | Versión No. 01    |
|---------------------------------|-----------------------------------|-----------------------|-----------|-------|--------------|--------------|-------------------|
| AREA- m2 =                      |                                   |                       |           |       |              |              | 865 m2            |
| No.                             |                                   | MARCA                 | UN.       | CANT. | VR. UNIT     | VR. PARCIAL  | VR. TOTAL         |
| I                               | Administración e Ingeniería       |                       |           |       |              |              | \$ 5.217.850      |
| 1.1                             | Director del Proyecto             |                       |           | 1     | \$ 2.371.750 | \$ 2.371.750 |                   |
| 1.1.1                           | Ingeniero ambiental               |                       |           | 2     | \$ 1.423.050 | \$ 2.846.100 |                   |
| II                              | Compras y Accesorios              |                       |           |       |              |              | \$ 4.434.400      |
| 2.1                             | Valvulas                          |                       |           |       |              |              | \$ 844.800        |
| 2.1.1                           | Valvulas de mariposa 1/2          | Grival                | Unid      | 3     | \$ 19.600    | \$ 58.800    |                   |
| 2.1.2                           | Medidor de flujo                  | Amspa                 | Unid      | 2     | \$ 393.000   | \$ 786.000   |                   |
| 2.2                             | Tuberías y accesorios             |                       |           |       |              |              | \$ 30.000         |
| 2.1.1                           | * Tubería de PVC 1/2 + accesorios | Pavco                 | m         | 3     | \$ 10.000    | \$ 30.000    |                   |
| 2.3                             | Bombas                            |                       |           |       |              |              | \$ 3.149.900      |
| 2.3.1                           | Bomba Centrífuga +accesorios      | Pedrollo              | Unid      | 1     | \$ 3.149.900 | \$ 3.149.900 |                   |
| 2.4                             | Otros                             |                       |           |       |              |              | \$ 409.700        |
| 2.4.1                           | Soldadura PVC                     | Pavco                 | 1/4 Galon | 2     | \$ 49.900    | \$ 99.800    |                   |
| 2.4.2                           | Removedor                         | Pcp                   | 1/4 Galon | 1     | \$ 84.900    | \$ 84.900    |                   |
| 2.4.3                           | Soporteria                        |                       | Kg        | 25    | \$ 9.000     | \$ 225.000   |                   |
| III                             | Instalación                       |                       |           |       |              |              | \$1.030.000       |
| 3.1                             | Montaje de tuberías               |                       |           | 1     | \$ 1.000.000 | \$ 1.000.000 | \$ 1.000.000      |
| 3.1.1                           | *Energía Eléctrica                |                       |           | 1     | \$ 30.000    | \$ 30.000    |                   |
| IV                              | VALOR TOTAL CAPEX                 |                       |           |       |              |              | \$ 10.682.250,000 |
|                                 |                                   |                       |           |       |              |              |                   |
| V                               | Operación                         |                       |           |       |              |              | \$ 60.000,000     |
| 3.1.2                           | Mantenimiento                     | Lavado y desinfección |           | 1 m3  | \$ 6.000     | \$ 60.000    | \$ 60.000         |
| IV                              | TOTAL OPEX                        |                       |           |       |              |              | \$ 60.000         |
| *Tubería pvc 1/2 de 6 m         |                                   |                       |           |       |              |              |                   |
| *Consumo energético de la bomba |                                   |                       |           |       |              |              |                   |

**Fuente:** Autores.

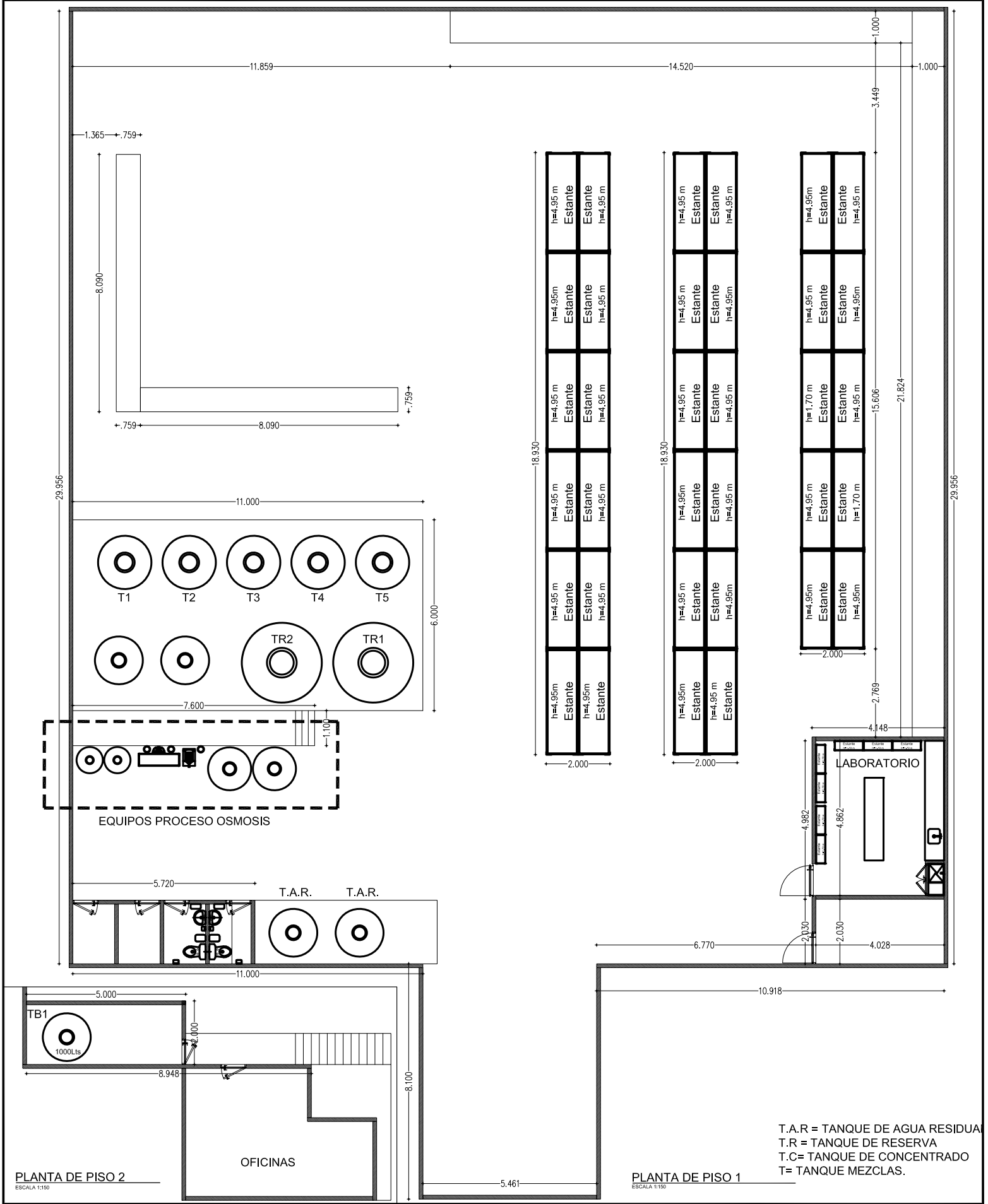
### ANEXOS 4. Presupuesto alternativa 3.

| PRESUPUESTO ALTERNATIVA 3   |   |        |           |         |               |               | Versión No. 01        |
|---|---|--------|-----------|---------|---------------|---------------|-----------------------|
| AREA- m2 =  |   |        |           |         |               |               | 865 m2                |
| No.   |   | MARCA  | UN        | CANT    | VR. UNIT      | VR. PARCIAL   | VR. TOTAL             |
| <b>I</b>  | <b>Administración e Ingeniería</b>                            |        |           |         |               |               | <b>\$ 5.217.850</b>   |
| 1.1   | Director del Proyecto   |        |           | 1       | \$ 2.371.750  | \$ 2.371.750  |                       |
| 1.1.1   | Ingeniero ambiental   |        |           | 2       | \$ 1.423.050  | \$ 2.846.100  |                       |
| <b>I</b>  | <b>Compras y Accesorios</b>                                   |        |           |         |               |               | <b>\$ 156.839.800</b> |
| 1.1   | <b>Valvulas</b>   |        |           |         |               |               | \$ 825.200            |
| 1.1.2   | Valvulas de mariposa 1/2                                      | Grival | Unid      | 2       | \$ 19.600     | \$ 39.200     |                       |
| 1.1.3   | Medidor de flujo  | Amspa  | Unid      | 2       | \$ 393.000    | \$ 786.000    |                       |
| 1.2   | <b>Tuberías y accesorios</b>                                  |        |           |         |               |               | \$ 155.510.000        |
| 1.2.1   | *Tubería de PVC 1/2 + accesorios                              | Pavco  | m         | 3       | \$ 20.000     | \$ 60.000     |                       |
| 1.2.2   | Evaporizador al vacio   |        |           | 1       | \$ 70.450.000 | \$ 70.450.000 |                       |
| 1.2.3   | Cristalizador   |        |           | 1       | \$ 85.000.000 | \$ 85.000.000 |                       |
| 2.4   | <b>Otros</b>  |        |           |         |               |               | \$ 504.600            |
| 2.4.1   | Soldadura PVC   | Pavco  | 1/4 Galon | 3       | \$ 49.900     | \$ 149.700    |                       |
| 2.4.2   | Removedor   | Pcp    | 1/4 Galon | 1       | \$ 84.900     | \$ 84.900     |                       |
| 2.4.3   | Soportería  |        | Kg        | 30      | \$ 9.000      | \$ 270.000    |                       |
| <b>II</b>   | <b>Instalación</b>  |        |           |         |               |               | <b>\$ 1.000.000</b>   |
| 2.1   | Montaje de tuberías   |        |           | 1       | \$ 1.000.000  | \$ 1.000.000  |                       |
| <b>TOTAL CAPEX</b>  |   |        |           |         |               |               | <b>\$ 163.057.650</b> |
| <b>III</b>  | <b>Operación (Costo mensual de funcionamiento del equipo)</b> |        |           |         |               |               | <b>\$ 14.411.828</b>  |
| 3.1.1   | Energía Eléctrica   |        | kWh       | 2256,98 | \$ 509,53     | \$ 1.149.999  | \$ 13.799.988         |
| 3.1.2   | Operario  |        |           | 2       | \$ 3.898      | \$ 311.840    |                       |
| 3.1.3   | *Mantenimiento  |        |           | 1       | \$ 300.000    | \$ 300.000    |                       |
| <b>TOTAL OPÉX</b>   |   |        |           |         |               |               | <b>\$ 14.411.828</b>  |
| *Tubería pvc 1/2 de 6 m   |   |        |           |         |               |               |                       |
| *Mantenimiento preventivo de equipos mecanicos sin cambio de piezas se debe realizar cada 2 meses |   |        |           |         |               |               |                       |

**Fuente:** Autores.

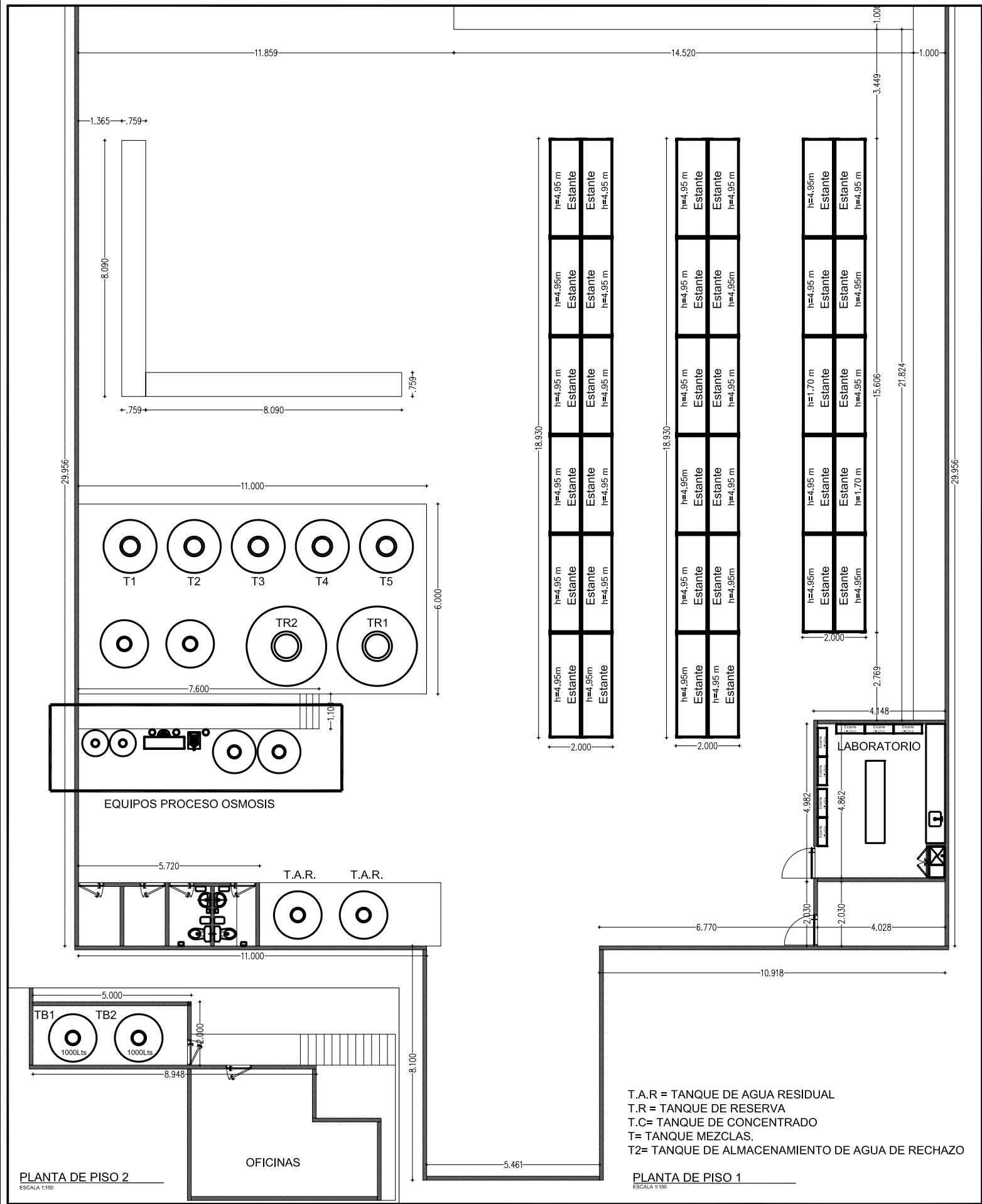
**ANEXO 5.**

***Layout de la empresa junto con la alternativa seleccionada***



|  |  |   |   |  |   |
|--|--|---|---|--|---|
| <b>PROYECTO:</b><br>PROPUESTA PARA EL APROVECHAMIENTO DEL AGUA DE RECHAZO DE UN SISTEMA DE OSMOSIS INVERSA | <b>DISEÑO:</b><br>DAYANA BENITEZ SUAREZ<br>GABRIELA DEL PILAR DUARTE | <b>CONTENIDO:</b><br>PLANTA PISO 1<br>PLANTA PISO 2 | <b>MODIFICACIONES:</b><br><div></div> <div></div> <div></div> <div></div> | <b>VERSIÓN:</b><br>0 13 DE FEBRERO DE 2020 | <b>FECHA:</b><br>FEBRERO DE 2020<br><b>ESCALA:</b><br>1:150<br><b>PLANO No:</b><br>1 DE 2<br><b>ARCHIVO DWG:</b><br>G-PLANOS<br><b>DT-1</b> |
|--|--|---|---|--|---|





|  |   |   |                             |   |                           |        |           |
|--|---|---|-----------------------------|---|---------------------------|--------|-----------|
| PROYECTO:<br>PROPUESTA PARA EL<br>APROVECHAMIENTO DEL AGUA<br>DE RECHAZO DE UN SISTEMA<br>DE OSMOSIS INVERSA | DISEÑO:<br>DAYANA BENITEZ SUAREZ<br>GABRIELA DEL PILAR DUARTE | CONTENIDO:<br>ALTERNATIVA<br>PLANTA PISO 1<br>PLANTA PISO 2 | MODIFICACIONES:<br><br><br> | VERSIÓN:<br>0 13 DE FEBRERO DE 2020<br><br> | FECHA:<br>FEBRERO DE 2020 |        |           |
|  |   |   |                             |   | ESCALA:<br>1:150          | 2 DE 2 | PLANO No: |
|  |   |   |                             |   | ARCHIVO DWG:              |        |           |
|  |   |   |                             |   | G-PLANOS                  |        | DT-2      |